

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SORUNLU BİYOKATILARIN AEROBİK
STABİLİZASYONU**

Çevre Yük. Müh. Şenol YILDIZ

**FBE Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 29 Kasım 2010
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet DEMİR (Y.T.Ü.)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ferruh ERTÜRK (Y.T.Ü.)
: Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK (İ.T.Ü.)
: Prof. Dr. Cumali KINACI (İ.T.Ü.)
: Doç. Dr. Eyüp DEBİK (Y.T.Ü.)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. BİYOLOJİK ARITMA ÇAMURLARININ ÖZELLİKLERİ VE BERTARAF METOTLARI	4
2.1 Arıtma Çamurlarının Kaynakları	4
2.2 Arıtma Çamurlarının Özellikleri	5
2.3 Arıtma Çamurlarının Arıtımı ve Bertarafı	9
2.3.1 Yoğunlaştırma	10
2.3.2 Stabilizasyon	10
2.3.3 Şartlandırma	11
2.3.4 Dezenfeksiyon	12
2.3.5 Çamur Susuzlaştırma	12
2.3.6 Çamur Kurutma	12
2.3.7 Zirai Kullanım	14
2.3.8 Düzenli Depolama	15
2.3.9 Yakma	17
2.4 Arıtma Çamuru Bertaraf Metotlarının Mukayesesi	17
2.5 Arıtma Çamurlarının Bertaraf Maliyetleri	21
3. TÜRKİYE VE AVRUPA BİRLİĞİNDE ÇAMUR YÖNETİMİ İLE İLGİLİ YASAL MEVZUAT VE GENEL DURUM	23
3.1 Ulusal Mevzuat	23
3.1.1 Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği	23
3.1.2 Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik	24
3.1.3 Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğine Karşı Suların Korunması Yönetmeliği	24
3.1.4 Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği	24
3.1.5 Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği	25
3.1.6 Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik	25
3.1.7 Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik	25
3.1.8 Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetm. ..	26
3.2 AB Direktifleri	27
3.2.1 Arıtma Çamuru Direktifi	27
3.2.2 Düzenli Depolama Direktifi	27
3.2.3 Tehlikeli Atıklar Direktifi	28
3.2.4 Kentsel Atıksu Direktifi	28
3.2.5 Tarımdan Gelen Nitrate Karşın Toprağın Korunması Direktifi	28

3.2.6	Atık Çerçeve Direktifi	28
3.2.7	Su Çerçeve Direktifi	29
3.3	Aritma Çamurları ile İlgili Avrupa Birliğinde Genel Durum	29
3.4	Türkiye’de Aritma Çamurlarının Durumu.....	31
3.5	İstanbul’da Aritma Çamurlarının Yönetimi.....	33
4.	ARITMA ÇAMURLARININ KOMPOSTLAŞTIRILMASI	36
4.1	Kompostlaştırma Prosesi	36
4.2	Kompostlaştırmanın Avantaj ve Dezavantajları;.....	41
4.3	Kompostlaştırmaya Etki Eden Parametreler	42
4.3.1	Su Muhtevası	43
4.3.2	Sıcaklık	45
4.3.3	Havalandırma.....	47
4.3.4	C/N Oranı.....	50
4.3.5	pH	52
4.3.6	Dane Boyutu	52
4.3.7	Hacim Artırıcı Malzemeler	53
4.3.8	Karıştırma	54
4.4	Kompostlaştırma Teknikleri	54
4.4.1	Aktarmalı Yığın Kompostlaştırma	55
4.4.2	Statik Yığın Kompostlaştırma	56
4.4.3	Kapalı Reaktör Tip Kompostlaştırma	57
4.4.3.1	In-Vessel Metodu Kompostlaştırma	58
4.4.3.2	Tünel Kompostlaştırma	58
4.4.3.3	Kutu ve Konteyner Tipte Kompostlaştırma.....	59
4.4.3.4	Dikey Akışlı Kompostlaştırma	59
4.5	Aritma Çamurlarının Kompostlaştırılması İle İlgili Literatür Çalışmaları.....	60
5.	DENEYSEL YAKLAŞIM	65
5.1	Pilot Reaktör Çalışmaları.....	69
5.2	Aktarmalı ve Statik Yığın Çalışmaları	71
5.3	Statik Yığın Çalışmaları	76
5.4	Organik Madde Kaybı Üzerinden Kompost Kinetiği	79
5.5	Etkin Mikrobiyal Türlerin Tespiti	79
5.5.1	Mikrobiyal Tür Analizleri.....	81
5.5.2	Nükleik Asit Ekstraksiyonu	81
5.5.3	Polimeraz Zincir Reaksiyonu	81
5.5.4	Denaturing Gradient Gel Electrophoresis.....	81
5.5.5	DNA dizi analizi	81
6.	DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	84
6.1	Pilot Reaktör Kompostlaştırma Çalışmaları	84
6.1.1	Reaktörlerdeki Başlangıç Hammadde ve Karışımların Özellikleri	84
6.1.2	Reaktör Kompostlaştırma Sürecinde Temel Parametrelerin Değişimleri	86
6.1.2.1	Sıcaklık	86
6.1.2.2	pH	87
6.1.2.3	İletkenlik	88
6.1.2.4	Su Muhtevası	90
6.1.2.5	Organik Madde	91
6.1.2.6	Amonyak.....	92

6.1.2.7	Çözünmüş KOİ	93
6.1.3	Reaktörlerdeki Organik Madde Kaybı Üzerinden Kompost Kinetiği	94
6.1.4	Reaktör Kompost Ürünü Özellikleri.....	95
6.2	Aktarmalı ve Statik Yığın Kompostlaştırma Çalışmaları	98
6.2.1	Aktarmalı ve Statik Yığınlardaki Başlangıç Hammadde ve Karışımların Özellikleri	98
6.2.2	Aktarmalı ve Statik Yığın Kompostlaştırma Sürecinde Temel Parametrelerin Değişimleri	99
6.2.2.1	Sıcaklık	99
6.2.2.2	pH	102
6.2.2.3	İletkenlik	102
6.2.2.4	Su Muhtevası	103
6.2.2.5	Organik Madde	104
6.2.2.6	Amonyak.....	105
6.2.2.7	Çözünmüş KOİ.....	106
6.2.2.8	Havalandırma.....	107
6.2.3	Aktarmalı ve Statik Yığın Kompost Ürünü Özellikleri.....	108
6.3	Statik Yığın Kompostlaştırma Çalışmaları.....	111
6.3.1	Statik Yığınlardaki Başlangıç Hammadde ve Karışımların Özellikleri	111
6.3.2	Statik Yığın Kompostlaştırma Sürecinde Temel Parametrelerin Değişimleri.....	113
6.3.2.1	Sıcaklık	113
6.3.2.2	pH	115
6.3.2.3	İletkenlik.....	115
6.3.2.4	Su Muhtevası	116
6.3.2.5	Organik Madde	117
6.3.2.6	Amonyak.....	118
6.3.2.7	Çözünmüş KOİ.....	119
6.3.2.8	Havalandırma.....	120
6.3.3	Statik Yığın Kompostlaştırmada Karbon Kaybı Üzerinden Kompost Kinetiği ..	121
6.3.4	Statik Yığın Kompostlaştırma Sürecinde Etkin Mikrobiyal Türler.....	122
6.3.5	Statik Yığın Nihai Ürün Özellikleri.....	127
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	134
	KAYNAKLAR.....	138
	ÖZGEÇMİŞ.....	143

KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
AKM	Askıda Katı Madde
AKR	Ardışık Kesikli Reaktör
BOİ	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
ÇMÜ	Çözünmüş Mikrobiyal Ürün
DGGE	Denaturing Gradient Gel Electrophoresis
İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR	Membran Biyoreaktör
MF	Mikro Filtrasyon
MW	Moleküler Ağırlık
NF	Nano Filtrasyon
ORP	Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli
PCR	Polimeraz Zincir Reaksiyonu
TDS	Toplam Çözünmüş Madde
TKN	Toplam Kjeldahl Azotu
TN	Toplam Azot
TO	Ters Ozmoz
TOK	Toplam Organik Karbon
TUYA	Toplam Uçucu Yağ Asidi
UF	Ultra Filtrasyon
UKM	Uçucu Katı Madde
UYA	Uçucu Yağ Asidi
YAÇY	Yukarı Akışlı Çamur Yataklı Reaktör

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Aritma tesislerinde çamurların kaynakları..... 5
Şekil 3.1	AB üye ülkelerinde kişi başına çamur üretim miktarları 29
Şekil 3.2	AB ülkelerinde 1996-1998 arası kullanılan çamur bertaraf sistemleri 31
Şekil 3.3	Türkiye’de çamur miktarlarının mevcut durumda (2002) ve gelecekte (2022) yerleşim yerleri büyüklüğüne göre değişimi..... 32
Şekil 4.1	Çamur kompostlaştırma prosesi akım şeması..... 38
Şekil 4.2	Kompostlaştırma mekanizması girdi ve çıktıları 39
Şekil 4.3	Aritma çamuru ve ağaç yongası karışımının kompostlaştırılması sırasında havalandırma hızının açığa çıkan su üzerine etkisi..... 44
Şekil 4.4	Kompostlaştırma sırasında elde edilen yüksek sıcaklıklar ile su muhtevası arasındaki ilişki 44
Şekil 4.5	Biyolojik ayrışabilirliği yüksek ve düşük atıklar için sıcaklık profil değişimi. 46
Şekil 4.6	Kompostlaştırma prosesinde sıcaklığın zamanla değişimi. 47
Şekil 4.7	Kompostlaştırma prosesinde havalandırma sistemi. 49
Şekil 4.8	Aktarmalı kompostlaştırma yığını ve karıştırıcı resmi. 55
Şekil 4.9	Havalandırmalı statik yığın kompostlaştırma sistemi şematik görünümü. 57
Şekil 5.1	Pilot kompost reaktörün şematik görünümü. 69
Şekil 5.2	Pilot reaktörlerin resimleri. 70
Şekil 5.3	Havalandırma borusunun özellikleri..... 73
Şekil 5.4	Havalandırma sistemine ait resimler..... 73
Şekil 5.5	Yığının genel şematik yapısı ve sıcaklık ölçüm noktaları. 74
Şekil 5.6	Kondens suyu tutucusu resmi ve vakumla gelen suyun tahliyesi. 75
Şekil 5.7	Aktarmalı ve statik yığınların görünümü. 75
Şekil 5.8	Biyofiltre. 76
Şekil 5.9	Statik yığınların hazırlanışı ve yığılara ait resimler. 77
Şekil 5.10	Yığınlarda sıcaklık ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi. 78
Şekil 5.11	Moleküler analiz yöntemlerinin uygulama akış şeması. 82
Şekil 6.1	Reaktörlerde sıcaklığın zamanla değişimi. 87
Şekil 6.2	Reaktörlerde pH nın zamanla değişimi..... 88
Şekil 6.3	Reaktörlerde iletkenliğin zamanla değişimi..... 89
Şekil 6.4	Reaktörlerde su muhtevasının zamanla değişimi..... 90
Şekil 6.5	Reaktörlerde organik maddenin zamanla değişimi..... 91
Şekil 6.6	Reaktörlerde amonyağın zamanla değişimi. 92
Şekil 6.7	Reaktörlerde çözünmüş KOI nin zamanla değişimi. 93
Şekil 6.8	Kompostlaştırma sürecinde reaktörlerdeki karışımlar için kinetik katsayılar. . 94
Şekil 6.9	Reaktörlerden elde edilen kompost ürünü fotoğrafları. 96
Şekil 6.10	Aktarmalı ve statik yığınlarda sıcaklığın zamanla değişimi. 100
Şekil 6.11	Aktarmalı ve statik yığınlarda pH nın zamanla değişimi..... 102
Şekil 6.12	Aktarmalı ve statik yığınlarda iletkenliğin zamanla değişimi. 103
Şekil 6.13	Aktarmalı ve statik yığınlarda su muhtevasının zamanla değişimi. 104
Şekil 6.14	Aktarmalı ve statik yığınlarda organik maddenin zamanla değişimi..... 105
Şekil 6.15	Aktarmalı ve statik yığınlarda amonyağın zamanla değişimi..... 106
Şekil 6.16	Aktarmalı ve statik yığınlarda KOI’nin zamanla değişimi. 107
Şekil 6.17	Aktarmalı ve statik yığın ürün numunelerine ait resimler. 109
Şekil 6.18	Statik yığınlarda sıcaklığın zamanla değişimi. 113
Şekil 6.19	Statik yığınlarda pH nın zamanla değişimi..... 115
Şekil 6.20	Statik yığınlarda iletkenliğin zamanla değişimi..... 116
Şekil 6.21	Statik yığınlarda su muhtevasının zamanla değişimi..... 117

Şekil 6.22	Statik yığınlarda organik maddenin zamanla değişimi.	118
Şekil 6.23	Statik yığınlarda amonyağın zamanla değişimi	119
Şekil 6.24	Statik yığınlarda KOI nin zamanla değişimi.....	119
Şekil 6.25	Statik yığın kompostlaştırma sürecinde yığınlar için kinetik katsayılar.	121
Şekil 6.26	Denature gradyan jel elektroforez görüntüsü ve bantlar.	123
Şekil 6.27	Statik yığınlardan elde edilen kompost ürünlerine ait resimler.	127
Şekil 6.28	Statik yığın denemesi respirometre sonuçları.	131
Şekil 6.29	Statik yığın denemesi kompost ürünlerinde Dewar testi sonuçları.....	133

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Arıtma sistemine göre arıtma çamurlarının özellikleri	6
Çizelge 2.2 Arıtma çamurlarının fiziksel özellikleri	8
Çizelge 2.3 Atıksu arıtma çamurlarının tipik ağır metal içeriği.....	8
Çizelge 2.4 Arıtma çamurları işleme ve bertaraf metotları.	9
Çizelge 2.5 Farklı susuzlaştırma metodu ve çamurlar için şartlandırıcı polimer miktarları	11
Çizelge 2.6 Arıtma çamurlarının düzenli depolama için uygunluğu	16
Çizelge 2.7 Arıtma çamuru bertaraf metotlarının avantaj ve dezavantajları	19
Çizelge 2.8 Çamur bertaraf metodlarının maliyet analizi	21
Çizelge 2.9 Avrupa ülkelerinde çamur bertaraf maliyetleri.....	22
Çizelge 3.1 Çamur yönetimiyle ilgili yasal mevzuatlar.	23
Çizelge 3.2 Toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurlarına ait sınır değerler.....	26
Çizelge 3.3 Arıtma çamuru direktifi limit değerleri.....	27
Çizelge 3.4 EU 27 ülkelerinde çamur üretim miktarları, çamurun tarımda kullanım oranları ve gelecekteki çamur üretim tahminleri.....	30
Çizelge 3.5 Master Plan (2000)'e göre atıksu arıtma stratejileri ve kuru çamur miktarları.	34
Çizelge 4.1 Kompostlaştırma prosesinde görev alan mikroorganizmalar.	40
Çizelge 4.2 Kompostlaştırma prosesinin avantaj ve dezavantajları.....	42
Çizelge 4.3 Kompostlaştırma prosesinde farklı oksijen ihtiyaçları	50
Çizelge 4.4 Çeşitli kompostlaşabilir maddelerin azot içerikleri ile C/N oranları	51
Çizelge 5.1 Yapılan analizlerin denemelere göre dağılımı.	67
Çizelge 5.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan analiz metotları.	68
Çizelge 5.3 Reaktörlerde kullanılan malzeme karışım oranları.	71
Çizelge 5.4 Aktarmalı ve statik yığınların içerikleri ve yığın boyutları.	72
Çizelge 5.5 Statik yığınların içerikleri ve boyutları.	76
Çizelge 6.1 Pilot reaktörde kullanılan malzemelere ait analiz sonuçları.	84
Çizelge 6.2 Reaktörlerin başlangıç atık karakterizasyonları.....	85
Çizelge 6.3 Reaktör kompost ürün analiz sonuçları.....	95
Çizelge 6.4 Kompostun toprakta kullanımında müade edilen maksimum ağır metal içerikleri.	98
Çizelge 6.5 Aktarmalı ve statik yığın malzemeleri başlangıç analizleri.	99
Çizelge 6.6 Aktarmalı ve statik yığınlara verilen hava miktarı.	108
Çizelge 6.7 Aktarmalı ve statik yığın kompost ürünleri analiz sonuçları.	109
Çizelge 6.8 Statik yığın başlangıç hammadde ve karışımların analizleri.	112
Çizelge 6.9 Statik yığınlara verilen hava miktarları.....	120
Çizelge 6.10 DGGE jelinden kesilen bandların sekans sonuçları.....	124
Çizelge 6.11 Statik yığın kompost ve İBB kompost tesisi ürün analizleri.....	128
Çizelge 6.12 CO ₂ tüketiminin Dewar kendiliğinden ısınma testi ile ilişkisi ve denklik dereceleri.....	131
Çizelge 6.13 Dewar ısınma testi stabilite sınıflandırması.	132

ÖNSÖZ

Doğadan ham madde ihtiyacının temini nasıl sonsuz değilse, çevre de kirletici emisyonlar için sınırsız büyüklükte bir hazne değildir. İnsan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan çevre kirlenmesi, çevre kalitesinin bozulmasına yol açmak suretiyle, kaçınılmayacak bir sorun olarak topluma geri döner. Bu yüzden çevre, toplumsal faaliyetlerden etkilenmeyen ayrı, bağımsız ve sınırsız bir ortam olarak düşünülmemeli, aksine küresel sistemin bir parçası olarak dikkatli ve etkin bir biçimde yönetilmelidir. Çevre kalitesinin korunmasına yönelik çalışmalarda evsel atık su arıtımı önemli bir yer tutar. Evsel atık su arıtımı beraberinde çamur üretimini dolayısıyla yeni bir arıtma sürecini getirir. Evsel atık suların biyolojik arıtımı sonucu oluşan çamurlarının pek çok arıtma ve bertaraf metodu bulunmaktadır. Biyolojik arıtma çamurlarının arıtımında kompostlaştırma ekonomik bir stabilizasyon tekniği olarak kullanılmaktadır.

Biyolojik çamurların arıtımı amacıyla kompostlaştırma esnasında susuzlaştırılmış çamur gözenekli yapı oluşturacak malzemelerle (yonga vb.) hem havanın nüfuzu için gözenek oluşturmak hem de su muhtevasının kontrolü amacıyla karıştırılır. Ayrıca kompostlaştırarak stabilizasyonun gerçekleştirilebilmesi için, biyolojik çamurların düşük olan C/N oranının istenen seviyelere çıkarılması amacıyla ilave karbon kaynağı malzemeler çamurla değişik oranlarda karıştırılarak proses edilir. Çalışma kapsamında evsel atıksu biyolojik arıtma çamurlarının kompostlaştırılarak stabilizasyonunda farklı boşluk doğurucu malzemelerin ve ilave karbon kaynaklarının etkisi değişik kompostlaştırma teknikleriyle denenerek ortaya konmuş ve stabilizasyon seviyelerinin tespitinde kompost kinetiği ile süreçte rol alan etkin mikrobiyal türlerin tespiti çalışmaları yapılmıştır.

Çalışmanın yürütülmesi ve yönlendirilmesindeki katkıları, gösterdiği yakın alaka ve desteği sebebiyle Sayın Hocam Prof. Dr. Ahmet DEMİR'e şükranlarımı arz ederim.

Ayrıca doktora tez izleme kurulunun değerli üyesi olan Sayın Prof. Dr. Ferruh ERTÜRK ve Sayın Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK'e katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamı yürütürken değerli katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Bestamin ÖZKAYA'ya ve Sayın Doç. Dr. Osman ARIKAN'a içtenlikle teşekkürü borç bilirim.

Deneysel çalışmaların yürütülmesi esnasında verdikleri araştırma imkânları sebebiyle, İSTAÇ A.Ş. Genel Müdürü Sayın Osman AKGÜL'e, katkılarını esirgemeyen Sayın Hasan SARI, Sayın Alpaslan KİRİŞ, Sayın Cengiz BASKE ve tüm mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmam esnasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme müteşekkirim.

ÖZET

SORUNLU BİYOKATILARIN AEROBİK STABİLİZASYONU

Bu çalışmada biyolojik arıtma çamurlarının tek başına ve ilave karbon kaynağı olarak mısır işleme endüstrisinden çıkan prekot çamuru ile organik evsel atıklarla birlikte havalı ortamda kompostlaştırılarak stabilizasyonu araştırılmıştır. İlave olarak, farklı hacim artırıcı maddelerin (yonga/sentetik malzeme) etkisi ortaya konmuş ve kompostlaştırma prosesi ile ilgili kinetik çalışmalar ile tür tayini çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda öncelikle pilot ölçekli reaktörlerde, akabinde tam ölçekli aktarmalı ve statik yığınlarda kompostlaştırma çalışmaları yürütülmüştür. Pilot reaktörlerde yürütülen çalışmada, katkı malzemesi olarak kullanılan yonga ve sentetik malzemenin kompostlaştırma prosesine etkisi açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir. Reaktörlerde, biyolojik çamurun ilave karbon kaynağı olmadan kompostlaştırılmasında ortamda yeterli kolay parçalanabilir karbon olmadığı görülmüştür. Çamura organik evsel katı atık ilavesi ile yeterli miktarda kolay parçalanabilir karbon sağlanamamıştır. Ancak, prekot ilavesi sisteme önemli miktarda kolay parçalanabilir karbon sağlamıştır. Aktarmalı ve statik yığınlarda yürütülen çalışmalarda biyolojik arıtma çamurlarının her iki teknikle de kompostlaştırılmasında evsel organik atık ile prekot katkısının iyi bir karbon kaynağı olduğu ve sekiz hafta sonunda stabil bir kompost ürünü elde edildiği görülmüştür. Kinetik çalışmalarda, reaktörlerde biyolojik ayrışabilirlik düşük (%25 civarı), yığın kompostlaştırmada ise yüksek (>%50) olmuştur. Statik yığınlarda, moleküler tekniklerle tür tanımlama çalışması sonucunda, tür profilinin farklı sıcaklık koşullarında farklı olduğu ve elde edilen sonuçların literatür verileri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Arıtma çamuru, kompostlaştırma, prekot, organik evsel katı atık.

ABSTRACT

AEROBIK STABILIZATION OF PROBLEMATIC BIOSOLIDS

In this study, the aerobic compost stabilization of biological treatment sludge alone and with corn-processing waste and organic household waste as additional carbon source was conducted. Additionally, effects of different type of bulking agents (wood chips, synthetic material) on composting have been revealed; furthermore kinetics of composting and bacterial culture is conducted. Within this coverage the study was conducted previously in pilot scale reactors than in full scale, windrow and static piles were used. According to the results from pilot reactor study there is no difference between the effects of wood chips and synthetic materials on composting process. During the reactor composting of biological sludge without any additional carbon source, it is exposed that there was not enough easy degradable carbon. Addition of organic waste to sludge did not supply the enough easy degradable carbon also. However, addition of prekot has supplied the important amount of easy degradable carbon to the process. The study which conducted on windrow and static piles showed that in composting of biological treatment sludge with these two techniques, addition of prekot and organic waste is a good source of easy degradable carbon and at the end of eight weeks stabilized compost product is produced. Kinetics of composting showed that the biodegradability in reactors are low (around 25%) , but its high ($> 50\%$) in pile composting. Bacterial culture analyses in static piles with molecular techniques showed that the culture profile is different at different temperatures and the results are parallel to the data in other researches.

Keywords: Biological treatment sludge, composting, corn-processing waste, organic household waste.

1. GİRİŞ

Ülkemizde ve gelişmekte olan ülkelerde artan nüfus ve sanayileşme sonucu oluşan aşırı tüketim ve yoğun kirlilik sebebiyle su kaynakları kirlenmektedir. Bu sebeple azalan temiz su kaynaklarının korunması amacı ile kurulan arıtma tesislerinin sayısı ise hızla artmaktadır. Ekolojik dengelerin korunmasına büyük yararı olan atıksu arıtma işlemleri sonucunda “arıtma çamuru” olarak tanımlanan, çevre için risk oluşturan yüksek su muhtevasına sahip ve arıtılan ham atıksuya kıyasla çok daha yüksek konsantrasyonda kirlilik içeren yeni bir atık meydana gelir. “Biyokatı” terimi ise özellikle ABD de “biyolojik arıtma çamuru” ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Oluşan arıtma çamurları, arıtılan atıksu miktarının sadece %1’i civarında olup önemli oranda su içermekte ve çok az miktarda katı madde ihtiva etmektedirler. Arıtma çamurları, gerekli şekilde muamele görmedikleri takdirde, atıksuyun arıtılmasıyla çevre ve sağlık açısından sağlanmış faydaları tersine çevirebilecek olumsuzluklar yaratabilirler. Miktarları her geçen gün artan arıtma çamurlarının çevresel sorunlar yaratmaması için mutlaka uygun yöntemlerle bertarafı gerekmektedir.

Türkiye’de, AB direktiflerine uyum sağlanması için yapılacak yatırımlar sonrası üretilecek yıllık çamur miktarının asgari 5,3 milyon m³ (%25 katı madde içeriğine sahip) olacağı hesaplanmıştır (Akça ve Knudsen, 2005). Arıtma çamurlarının tarımda kullanım miktarı düşük olup yılda 50.000 – 100.000 ton civarındadır (Akça ve Knudsen, 2005). Bu miktarın önümüzdeki yıllarda mutlaka artırılması, oluşacak yüksek miktardaki çamurun uygun maliyetle arıtımının sağlanması açısından gereklidir.

Arıtma çamurlarının etkili ve ekonomik şekilde, çevreyi tehdit etmeden yasal düzenlemelere uyularak bertaraf edilmesi tüm atıksu arıtımı sürecindeki en önemli sorunu oluşturmaktadır. Arıtma tesislerinin toplam giderlerinin yaklaşık %50’sini, arıtma çamurlarının bertarafının oluşturduğu gözönüne alındığında, bu atıkların yönetiminin ancak ekonomik ve sürdürülebilir alternatiflerle sağlanabileceği görülmektedir. Arıtma çamurlarının bertaraf metodu seçiminde, çamurun karakterizasyonu, mevcut yasalar ve getirdiği sınırlamalar, mali denge ve çamurun kullanım amacı gibi pek çok parametre etkilidir. Türkiye'deki arıtma çamurları genellikle katı atıklarla birlikte depolama sahalarında (düzenli veya düzensiz) uzaklaştırılmaktadır. Ülkemizde evsel atıksu arıtma çamurlarının, yakılarak ya da kentsel katı atıklar için kurulan kapasitesi sınırlı düzenli depolama sahalarına gömülerek yüksek maliyetle uzaklaştırılması yerine, AB politikalarının da teşvik ettiği bir yöntem olan tarım alanlarına uygulanması çok daha uygun bir yaklaşımdır. Bu çerçevede evsel arıtma çamurlarının diğer alternatiflere göre düşük maliyetli olan kompostlaştırma yöntemi ile gübre değerini koruyarak stabilizasyonunun

sağlanması, böylelikle ekonomik değeri olan bir ürün haline getirilmesi üzerinde durulması gereken bir seçenektir. Bununla birlikte arıtma çamurlarının kompostlaştırılması için gerekli optimum koşulların belirlenmesi ve Türkiye’de bu alanda bilgi birikiminin artırılması önem arz etmektedir. Kompostlaştırma yöntemiyle stabilizasyonunun sağlanmasında en kritik husus yüksek sıcaklıklara (55 °C ve üstü) ulaşılmasıdır. Bununla birlikte, arıtma çamurları gibi yeterli kolay parçalanabilir karbonun olmadığı atıkların kullanıldığı kompostlaştırma proseslerinde, sözkonusu sıcaklıklara ulaşmak problem olabilmektedir. Bu durumda arıtma çamurlarına farklı karbon kaynakları ilave edilmek suretiyle stabilizasyon sağlanabilmektedir.

Biyolojik arıtma çamurlarıyla birlikte ülkemizde, her ilde mutlaka uygun metotlarla bertaraf edilmesi gereken bir diğer atık türü de evsel katı atıklardır. Bu atıkların ortalama %50 si organik kısım olup biyolojik proseslerle arıtılabilmektedir. Ülkemizde, günde yaklaşık olarak 30 milyon ton evsel katı atık üretilmektedir. Bunun 15 milyon tonu biyolojik olarak arıtılabilir organik kısımdır. Avrupa Birliği uyum sürecinin getirdiği gereklilikler yasal mevzuatımıza yansıtıldıkça evsel atıkların bertarafı daha da önem kazanmaktadır. Uyum sürecinin gereklerinden biri olan organik evsel atıkların depolanmasının zamanla azaltılması, artık yönetmeliklerle zorunlu hale getirilmiştir. Bu durum evsel organik atıkların farklı metotlarla ön arıtmaya tabi tutulmasını veya yakılmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Yakma sistemlerinin maliyeti dikkate alındığında, ülkemizde, organik evsel atıklar için en uygun arıtma sisteminin kompostlaştırma olduğu söylenebilir.

Bu çalışmanın amacı, arıtma çamurlarına ilave karbon kaynağı olarak, mısır işleme endüstrisinden çıkan prekot çamuru ve evsel organik atık ilave edilerek kompostlaştırma ile stabilizasyonunun araştırılmasıdır. Biyolojik arıtma çamurları, patojen mikroorganizma muhteviyatı, yüksek nem içeriği ve biyobozonur yapısıyla problemli bir biyokatıdır. Evsel organik atıklar da benzer şekilde yüksek nem ve organik madde içeriği ile patojen mikrororganizma ihtivasi bakımından uygun arıtma ve bertarafa ihtiyaç duyan problemli atıklardır. Prekot çamurları ise çok yüksek organik madde içerikleri dolayısıyla arıtım gerektiren sorunlu biyokatılardır. Uygun metotlarla arıtım ve bertaraf gerektiren biyolojik arıtma çamurları, prekot çamuru ve evsel organik atıkların birlikte arıtımı, çoklu problemi ortak faydaya dönüştürebilecektir. Sorunlu bu üç atığın birlikte arıtımı amacıyla yürütülen çalışma kapsamında öncelikle 12 adet pilot reaktörde iki paralelli denemeler yürütülmüş, biyolojik çamurların kompostlaştırılmasında ilave karbon kaynağı olarak prekot ve organik evsel atık ile hacim artırıcı malzeme olarak yonga ve sentetik hacim artırıcı malzemelerin etkisi ortaya konmuştur. Pilot reaktör çalışmasından elde edilen sonuçlar kullanılarak tam

ölçekli 3 adet aktarmalı ve 4 adet statik yığında çalışmalar yürütülmüştür. Bu sayede farklı kompostlaştırma metotlarının prosese etkisi belirlenmiştir. Son olarak ise statik yığın çalışmaları tam ölçekli 4 yığında tekrar edilmiştir. İlave olarak, kinetik çalışmalar yapılmış ve etkin olan mikrobiyal türler, PCR (Polimeraz zincir reaksiyonu), DGGE (Denature gradyan jel elektroforezi) ve dizi analizi temelli moleküller tekniklerle belirlenmiştir.

Çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. 1. Bölümde biyolojik arıtma çamurları (biyokatılar) genel olarak değerlendirilmiştir. 2. Bölümde arıtma çamurlarının kaynakları, miktarları, bertaraf metotları ve bertaraf metotlarının maliyet analizi incelenmiştir. 3. Bölümde arıtma çamurlarının yönetimi ile ilgili Türkiye ve Avrupa Birliğinde yasal düzenlemeler özetlenerek Türkiye ve diğer ülkelerde çamur yönetimi ile ilgili bilgiler verilmiştir. 4. Bölümde arıtma çamurlarının kompostlaştırılması hakkında detaylı bilgi verilerek konu ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar özetlenmiştir. 5. Bölümde Deneysel çalışma düzeneği, kullanılan malzeme ve yöntemler hakkında detaylı bilgi verilmiştir. 6. Bölümde deneysel çalışmalar esnasında yürütülen havalandırmalı pilot reaktör kompostlaştırma, aktarmalı ve statik yığın ile statik yığın tekrarı çalışmalarından elde edilen sonuçlar verilerek değerlendirilmiştir. Son bölüm olan 7. Bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir

2. BİYOLOJİK ARITMA ÇAMURLARININ ÖZELLİKLERİ VE BERTARAF METOTLARI

Aritma çamuru, su ve atıksuların arıtımında ortaya çıkan, taşıdıkları özelliklerden dolayı kendilerinin de ayrıca arıtılmaları gereken, arıtılmadan çevreye verildiklerinde çevrede hasar oluşturabilecek, katı ve sıvı karışımından oluşan maddelerdir (Sanin, 2007). Yüksek miktarlarda organik madde, besin maddeleri, patojen mikroorganizmalar ve su içerdiklerinden arıtılmaları gerekmektedir. Aritma çamurları fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma işlemleri uygulanması sonucunda çökebilir veya yüzebilir hale getirilen katı maddelerden oluşmaktadır. Arıtılan suyun niteliğine ve uygulanan arıtma işlemlerine bağlı olarak arıtma çamurlarının özellikleri değişmektedir. Genel olarak arıtma çamurları, sıvı ya da yarı katı halde, kokulu, %0,25 ile %12 arasında katı madde içeren atıklardır (Akça, 2005).

Aritma çamurlarının önemli bir kısmı sudur. Özellikle biyolojik arıtma işleminden oluşan arıtma çamurlarının organik madde içeriği çok yüksek olduğu için bu tip çamurlar bozunma ve kokuşma eğilimindedir. Çamurlar fiziksel yapılarına, mikrobiyolojik özelliklerine, besi maddesi muhtevasına, su verme özelliği ve metal içeriğine göre değerlendirilmelidir. Evsel nitelikli atıksuların arıtıldığı arıtma tesislerinde oluşan çamurların özellikleri birbirine benzemekle beraber, endüstriyel kaynaklı çamurların özellikleri endüstriden endüstriye büyük farklılıklar göstermektedir.

2.1 Arıtma Çamurlarının Kaynakları

Genel olarak arıtma çamurları iki ana kaynağa sahiptir (Sanin, 2007). Bunlar;

- İçme suyu arıtma tesislerinden gelen arıtma çamurları
- Atıksu arıtma tesislerinden gelen arıtma çamurları

Aritma tipine ve amacına göre arıtma çamurlarının cinsleri farklılık göstermektedir (Akça, 2005). Bunlar;

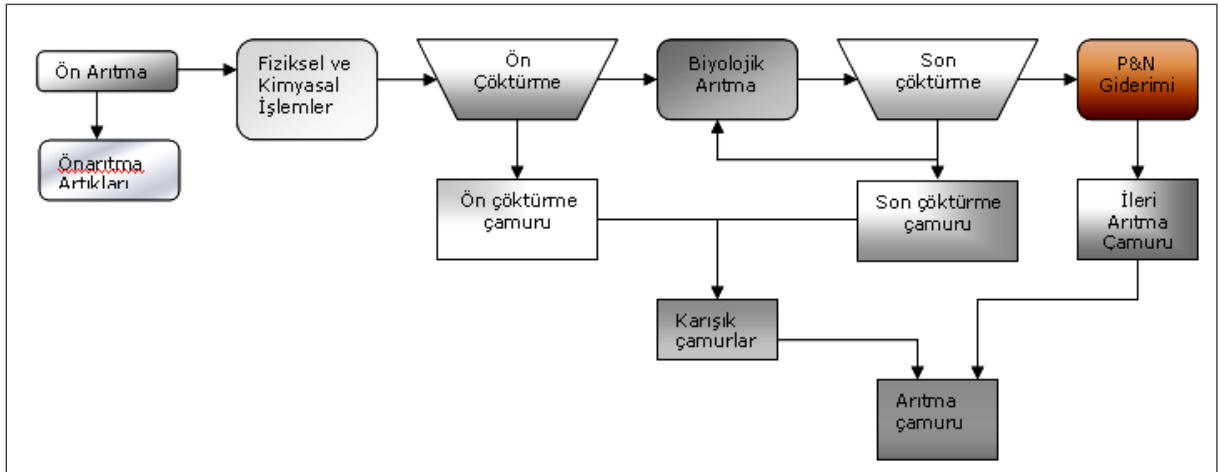
- Çökebilen katı maddelerin oluşturduğu ön çökeltim çamurları,
- Biyolojik arıtma işlemleri sonucu oluşan biyolojik çamurlar
- Kimyasal arıtma ve koagülasyon sonucu oluşan kimyasal çamurlar,
- İleri Arıtma Çamurları

Ön çökeltim çamurları, ön çökeltme havuzlarından kaynaklanan çamurlardır ve kendiliğinden çökebilen katı maddeleri içermektedir. Ortalama olarak % 3-5 katı madde içeren oldukça sulu ve kokuşma eğilimi yüksek çamurlardır.

Biyolojik çamurlar, son çöktürme havuzunda çöktürülerek ve sistemden atılarak uzaklaştırılması gereken çamurlardır. Yüksek miktarlarda su ve organik madde içerirler. Biyolojik arıtma çamurlarının özellikleri kullanılan biyolojik arıtma işlemine göre değişiklik göstermektedir. Organik maddelerin oksidasyonu amacıyla en yaygın kullanılan biyolojik arıtma işlemi aktif çamur sistemidir. Aktif çamur sistemlerinden kaynaklanan çamurların stabilizasyon derecesi değişmektedir. Genel ilke olarak çamur yaşı 20 günün üzerinde olan tesislerden kaynaklanan çamurlar stabil kabul edilmekte, daha küçük çamur yaşına sahip tesislerin biyolojik çamurları için ayrıca çamur çürütme veya benzeri stabilizasyon işlemi uygulanması gerekmektedir.

Kimyasal çamurlar, kimyasal arıtma işlemleri sonucunda oluşan çamurlardır ve özellikleri atıksuyun özelliğine ve kullanılan kimyasal maddelere bağlı olarak değişmektedir. Özellikle, ağır metal ve biyolojik olarak parçalanamayan toksik organik maddeleri içeren endüstriyel atıksuları arıtmak amacıyla kullanılan kimyasal arıtma ünitelerinden kaynaklanan arıtma çamurlarının bertarafında tehlikeli atık bertaraf süreçleri gerekebilir.

İleri arıtma çamuru, konvensiyonel sistemlere ilave olarak yapılan ileri arıtmalarda, özellikle azot, fosfor gibi alıcı ortamlarda ötrofikasyona neden olabilecek nütrientlerin sudan uzaklaştırılırken açığa çıkan çamurdur. Arıtma çamurlarının kaynaklarının şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Arıtma tesislerinde çamurların kaynakları (EC, 2001).

2.2 Arıtma Çamurlarının Özellikleri

Seçilen arıtma sistemine göre oluşacak arıtma çamurlarının özellikleri Çizelge 2.1 de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Arıtma sistemine göre arıtma çamurlarının özellikleri (Metcalf ve Eddy, 2003).

Çamur ve katı atık	Tanımlama
Izgara ve elekten tutulan atıklar	Büyük boyutlu organik ve inorganik maddelerin tutulmasında kullanılır. Organik madde içeriği sistemin yapısına ve mevsime göre değişim gösterir.
Kum	Hızlı çökme özelliğine sahip, ağır inorganik katılardan oluşmaktadır. İşletme şartlarına bağlı olarak yağ ve gres gibi organik maddeleri de içerirler.
Köpük/yağ	Birincil ve ikincil çöktürme havuzları yüzeyinden sıyrılarak alınan yüzen maddeleri içerir. Köpük, yağ, bitkisel ve mineral yağlar, hayvansal katı yağlar, parafin, sabun, yiyecek atıkları, sebze ve meyve kabukları, saç, kağıt ve karton, izmarit, plastik maddeler, kum ve benzeri maddeleri içerir. Özgül ağırlığı genellikle 0.95'dir.
Birincil çamur	Birincil (ön) çöktürmeden çıkan çamur gri ve yapışkan olup, çoğu zaman yoğun kokuludur. Bu çamur kolaylıkla çürütülebilir.
Kimyasal çöktürme çamuru	Metal tuzları ile yapılan çöktürmeden çıkan çamur koyu renkli, demir içeriği yüksek kırmızı renklidir. Kokusu birincil çamur kadar yoğun değildir. Çamurdaki demir veya alümin hidratları, çamuru jelatinimsi yapar. Tankta bırakılması durumunda birincil çamur gibi yavaş bir çürümeye uğrar. Önemli miktarda gaz çıkışı olur ve tankta uzun süreli kalırsa çamur yoğunluğu artar.
Aktif (Biyolojik) çamur	Kahverengi ve flok ağırlıklıdır. Koyu renk gözleniyor ise septik şartlar oluşmuş demektir. Renk açık ise az havalandırma sonucu çökme özelliği kötü çamurdur. İyi şartlardaki çamur toprak kokusundadır. Çamur kolaylıkla septikleşmeye meyillidir, çürük yumurta kokusu yayabilir. Yalnız veya birincil çamurla karışmış aktif çamur kolayca çürüyebilir.
Damlatmalı fitre çamuru	Kahverengimsi, floklu ve taze olduğunda nispeten kokusuzdur. Aktif çamura göre daha yavaş parçalanmaya uğrar ancak kolay çürütülebilir.
Aerobik çürütülmüş çamur	Kahve ve koyu kahve renklidir Floküler özelliklidir. Kötü kokulu olmayıp çoğunlukla küf kokuludur. İyi çürütülmüş çamur kurutma yataklarında kolaylıkla susuzlaştırılabilir.
Anaerobik çürütülmüş çamur	Koyu kahve-siyah renkli olup, çok miktarda gaz içerir. Tam çürütüldüğünde, kötü kokmaz, kokusu hafif, sıcak katran, yanmış lastik veya mühür mumu gibidir. Çamur ince tabak şeklinde, kurutma yatağına yayıldığında, katılar yüzeyde tutulur, su hızlı şekilde drene olur ve katılar yatak üzerinde yavaşça çökerler. Çamur kurudukça, gaz çıkar, zengin bahçe toprağı özelliklerindedir.
Çamur kompost ürünü	Koyu kahve-siyah renklidir. Ancak kompostlaştırmada kullanılan odun kırıntıları ve geri döndürülen kompost dolayısıyla renk değişebilir. İyi kompostlaştırılmış çamur kokusuz olup, ticari değerde bahçe toprağı şartlandırıcısı olarak kullanılabilir.
Fosseptik çamuru	Siyah renklidir. İyi çürütülmemesi durumunda hidrojen sülfür ve diğer gazlardan dolayı kötü koyu yayar. Bu durumdaki çamurun kurutulmasında ciddi koku problemi ile karşılaşılır.

Atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamur, stabilizasyon işlemlerinden önce %50-70 C, %6,5-7,3 H, %21-24 O, %15-18 N, %1-1,5 P ve %0-2,4 S içermektedir (Akça, 2005).

Çamur özellikleri çamur işleme ve bertaraf etme ünitelerinin tasarımı ve işletilmesi için kullanılmaktadır. Bu parametreler, çamurun organik madde içeriği, kimyasal özellikleri, çökelebilmek, su verme gibi fiziksel özellikleri ve ısı değeri hakkında bilgi vermektedir. Çamur özelliklerinin tespitinde aşağıdaki parametreler kullanılmaktadır:

- Özgöl ağırlığı
- Katı madde içeriği
- Su dağılımı
- Sıkışkanlık özelliği
- Isıl değer
- Partiküllerin elektriksel yükleri
- Biyolojik özellikler
- Ağır metal içeriği
- Pompalanabilirliği
- Depolanabilirliği
- Susuzlaşabilme özellikleri

Çamurun katı madde içeriği olduğu birime göre değişim göstermektedir. Ön çökeltim çamuru %3-5, aktif çamur %0,5-2, yoğunlaştırılmış çamur % 5-10 katı madde içermektedir. Katı madde içeriği %15'i geçen çamur akışkanlığını kaybetmektedir. Yoğunlaştırma ve su verme işlemleri uygulandıktan sonra çamur katı madde içeriği uygulanan yönteme bağlı olarak %50'ye kadar çıkabilmektedir. Çeşitli proses ve işlemler sonucu üretilen çamur miktarı ve fiziksel özellikleri ile ilgili bilgiler Çizelge 2.2 de verilmiştir.

Arıtma çamurları çok farklı kaynaklardan olduğu için her kaynakta değişik organizmaların büyümesi için farklı besin maddeleri vardır. Ayrıca arıtma çamurlarında hastalık yapıcı mikroorganizmaların (patojenlerin) bulunması ve üremesi de mümkündür. Arıtılan atıksuyun tipine bağlı olarak, özellikle ham ön çökeltim çamuru çok sayıda ve değişik türde organizma içermektedir. Özellikle arıtma çamurlarının tarımsal amaçlı kullanılması durumunda patojen mikroorganizma ve organik madde içeriği çok önemlidir. Bunun için mutlaka stabilizasyon işlemleri uygulanarak organik madde ve patojen giderimi yapılmalıdır.

Çizelge 2.2 Arıtma çamurlarının fiziksel özellikleri (Metcalf ve Eddy, 2003).

Arıtma işlemleri ve prosesleri	Çamur katısının özgül ağırlığı	Çamurun özgül ağırlığı	Kuru madde kg/10 ³ m ³	
			Aralık	Tipik
Birincil çamur	1,4	1,02	110-170	150
Aktif çamur ^a	1,25	1,005	70-100	80
Damlatmalı filtre humusu ^a	1,45	1,025	60-100	70
Uzun havalandırmalı sist. ^a	1,3	1,015	80-120	100 ^a
Havalandırmalı lagün ^a	1,3	1,01	80-120	100 ^a
Filtrasyon tesisi	1,2	1,005	12-24	20
Alg giderimi	1,2	1,005	12-24	20
Ön çöktürme ^b (fosfor giderimi için)				
Düşük dozda kireç (350-500 mg/l)	1,9	1,04	240-400	300 ^b
Yüksek dozda kireç (800-1600 mg/l)	2,2	1,05	600-1300	800 ^b
Askıda büyüyen A.Ç. ile denitrifikasyon	1,2	1,005	12-30	18
Kaba kum filtreler	1,28	1,02	-	- ^c

^a: Ön arıtma olmadığı varsayılmıştır. ^b: Bununla birlikte ön çöktürmede de çamur giderilir. ^c: İkincil arıtım prosesinden gelen çamuru da içerir.

Kentsel atıksu arıtma tesislerinde ve bazı endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları farklı konsantrasyonlarda ağır metal içermektedir. Çizelge 2.3 te arıtma çamurlarındaki ağır metaller ve aralıkları verilmiştir.

Çizelge 2.3 Atıksu arıtma çamurlarının tipik ağır metal içeriği (Metcalf ve Eddy, 2003).

Ağır metal	Kuru çamur (mg/kg)	
	Aralık	Ortalama
Arsenik	1,1- 230	10
Kadmiyum	1- 3.410	10
Krom	10- 99.000	500
Kobalt	11,3- 2.490	30
Bakır	84- 17.000	800
Demir	1.000- 154.000	17.000
Kurşun	13- 26.000	500
Manganez	32- 9.870	260
Civa	0,6- 56	6
Molibden	0,1- 214	4
Nikel	2- 5.300	80
Selenyum	1,7- 7,2	5
Kalay	2,6-329	14
Çinko	101-49.000	1700

2.3 Arıtma Çamurlarının Arıtımı ve Bertarafı

Arıtılmamış atıksu içindeki önemli miktarlarda koku veren maddelerin olması, biyolojik arıtmada oluşan çamurun bozunma ve kokuşma eğiliminde olması, çamurun sadece küçük bir kısmının katı madde, büyük bir kısmının ise sudan oluşması ve içerisinde patojen mikroorganizma olmasından dolayı nihai bertaraf öncesi mutlaka arıtılmaları gerekmektedir.

Atık bünyesindeki kirleticileri üç grup altında toplamak mümkündür. Bunlar; çökebilir katı maddeler, askıda katı maddeler ve çözünmüş katı maddelerdir.

Arıtma çamurlarının işleme ve bertaraf metotları genel olarak Çizelge 2.4 teki gibi sıralanmaktadır.

Çizelge 2.4 Arıtma çamurları işleme ve bertaraf metotları (Metcalf ve Eddy, 2003).

İşletme, proses ve arıtma metotları	Fonksiyonları
Birincil İşlemler - Çamur öğütme - Kum ayırma - Çamur karıştırma - Çamur saklama	Boyut küçültme Kum ayırma Karıştırma Depolama-saklama
Yoğunlaştırma - Graviteli yoğunlaştırıcı - Flotasyonlu yoğunlaştırıcı - Santrifüjlü yoğunlaştırıcı - Bantlı yoğunlaştırıcı - Döner elekli yoğunlaştırıcı	Hacim azaltma Hacim azaltma Hacim azaltma Hacim azaltma Hacim azaltma
Stabilizasyon - Kireç stabilizasyonu - Isıl işlem - Anaerobik çürütme - Aerobik çürütme - Kompostlaştırma - Klor Oksidasyonu	Stabilizasyon Stabilizasyon Stabilizasyon, kütle azaltma Stabilizasyon, kütle azaltma Stabilizasyon, yeni ürün
Şartlandırma - Kimyasal şartlandırma - Termal (ısı)	Çamur şartlandırma Çamur şartlandırma
Dezenfeksiyon - Pastörizasyon - Uzun-süreli saklama	Dezenfeksiyon Dezenfeksiyon

Susuzlaştırma ▪ Vakum filtre ▪ Santrifüj ▪ Bant filtre ▪ Pres filtre ▪ Çamur kurutma yatakları ▪ Çamur lagünleri	Hacim azaltma Hacim azaltma Hacim azaltma Hacim azaltma Hacim azaltma Saklama ve Hacim azaltma
Isıl kurutma ▪ Flaş kurutucu ▪ Sprey kurutucu ▪ Döner tamburlu kurutucu ▪ Çok hücreli kurutucu ▪ Çoklu etkili buharlaştırıcı	Kütle ve hacim azaltma Kütle ve hacim azaltma Kütle ve hacim azaltma Kütle ve hacim azaltma Kütle ve hacim azaltma
Termal Azaltma ▪ Çok hücreli yakıcı ▪ Akışkan yataklı yakıcı ▪ Katı atıklarla birlikte yakma ▪ Islak-hava oksidasyonu ▪ Derin şaft reaktörü	Hacim azaltma, kaynak geri kazanımı Hacim azaltma Hacim azaltma Stabilizasyon, hacim azaltma Stabilizasyon, hacim azaltma
Nihai bertaraf ▪ Arazide arıtma ▪ Dağıtım ve pazarlama ▪ Kimyasal sabitleme ▪ Düzenli depolama ▪ Lagünlerde biriktirme	Nihai uzaklaştırma Faydalı kullanım Faydalı kullanım, Nihai uzaklaştırma Nihai uzaklaştırma Hacim azaltma,

2.3.1 Yoğunlaştırma

Yoğunlaştırma, çamur karışımındaki sıvıyı azaltarak katı mihteviyatın artırılması işlemidir. Yoğunlaştırma genellikle gravite, flotasyon, santrifüj ve graviteli bant filtre gibi fiziksel metotlarla yapılmaktadır.

2.3.2 Stabilizasyon

Çamur stabilizasyonu, patojenlerin azaltılması ve istenmeyen kokunun giderilmesini temin etmek amacıyla uygulanmaktadır. Çamur stabilizasyonunda kullanılan başlıca teknolojiler aşağıda verilmiştir:

- Kireç stabilizasyonu,
- Isıl arıtım,
- Anaerobik çürütme,
- Aerobik çürütme,
- Kompostlaştırma,
- Klor oksidasyonu

2.3.3 Şartlandırma

Çamurun susuzlaşabilme özelliğini arttırmak amacıyla uygulanan şartlandırmada en yaygın kullanılan metotlar kimyasal ilavesi ve ısıtma arıtmadır.

Kimyasal şartlandırma katının koagülasyonu ve absorbe suyun serbest hale geçirilmesi esasına dayanır ve şartlandırma, vakum filtre, santrifüj, bant filtre ve pres filtre gibi ileri mekanik susuzlaştırma sistemleri öncesinde kullanılır.

Polimer dozajları, kullanılan polimerin molekül ağırlığına, iyonik şiddetine ve aktivite seviyesine bağlıdır. Demir klorür ve kireç, vakum ve pres filtrelerde şartlandırma için en sık kullanılan kimyasallardır.

Genel olarak gerekli kimyasal dozu, çamurun cinsine bağlı olarak değişir. Farklı çamurlar için susuzlaştırma metotları ve şartlandırıcı polimer miktarları Çizelge 2.5 te verilmiştir.

Çizelge 2.5 Farklı susuzlaştırma metodu ve çamurlar için şartlandırıcı polimer miktarları (Metcalf ve Eddy, 2003).

Çamur Tipi	Kg Polimer/10 ³ kg kuru katı		
	Vakum Filtre	Bant Filtre	Santrifüj
Birincil Çamur	1-5	1-4	0,5-2,5
Birincil ve Aktif Çamur	5-10	2-8	2-5
Birincil ve Damlatmalı Filtre Humusu	1,25-2,5	2-8	-
Atık Aktif Çamur	7,5-15	4-10	5-8
Havasız Çürütülmüş Birincil Çamur	3,5-7	2-5	3-5
Havasız Çürütülmüş Birincil+Aktif Çamur	1,5-8,5	1,5-8,5	2-5
Havalı Çürütülmüş Birincil+Aktif Çamur	7,5-10	2-8	-

Stabilizasyon ve şartlandırma temin eden ısıtma sürekli bir proses olup, 260°C'ye kadar 2760 kN/m² basınçta yaklaşık 30 dk gibi kısa sürede çamurun ısıtılması esas almaktadır. Böylece çamur yüksek sıcaklık ve basınç altında kaldığında ısıtma aktivite ile bağlı su çamurdan ayrılmakta ve çamur koagüle olmaktadır.

Çamur şartlandırmada; UV uygulaması, çamurun dondurulması ve çözülmesi, çamur asidifikasyonu gibi diğer prosesler de bulunmaktadır.

2.3.4 Dezenfeksiyon

Çamurdaki patojen mikroroganizmaların yun araziye yok edilmesi amacıyla değişik dezenfeksiyon metotları kullanılmaktadır. Bu metotlar genel olarak aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Pastörizasyon
- Şartlandırma, ısı kurutma, yakma ve piroliz gibi diğer ısıl prosesler
- Yüksek pH arıtımı,
- Çürütülmüş sıvı çamurun uzun süreli depolanması
- Çamurun stabilizasyonu ve dezenfeksiyon için klorür ilavesi
- Diğer kimyasallarla dezenfeksiyon
- Yüksek enerjili ışın uygulaması ile dezenfeksiyon
- Kompostlaştırma

2.3.5 Çamur Susuzlaştırma

Çamurun susuzlaştırılması, vakum, pres filtre, yatay belt filtre, burgulu pres, santrifüj gibi fiziksel metotlarla veya kurutma yatakları, çamur lagünleri gibi proseslerle temin edilebilmektedir. Vakum, pres ve belt filtre gibi sistemler; ve teçhizat gerektiremekanik aksamla birlikte kalifiye personel gerektiren, ayrıca yatırım ve işletme maliyetleri yüksek olan sistemlerdir. Kurutma yatakları ise inşa ve işletme kolaylığı ile nispeten daha düşük yatırım ve işletme maliyetlerine sahiptir ancak fazla alana ihtiyaç duyarlar. Çamurlar çürütüldükten sonra çamur kurutma yataklarına verilebilir. Bazı aktif çamur tesislerinde, çürütme öncesi çamur yoğunlaştırma uygulanmaktadır.

2.3.6 Çamur Kurutma

Temelde, arıtma çamurunun kurutulması için, herhangi özel bir ön şart bulunmamaktadır. Bu, bilinen tüm evsel atık su arıtma tesisi kaynaklı arıtma çamurlarının doğru şekilde tasarlanan ve işletilen kurutma tesisinde işlenebileceği anlamına gelmektedir. Arıtma çamuru, kurutmadan hemen sonra yakılacak ise kuru katı miktarı % 40-50 mertebesine yükseltilmektedir. Arıtma çamuru gübre, ek yakıt gibi çok amaçlı kullanımlar için paketlenenirse kuru katı oranı %90-95 mertebesine çıkartılıp, granüle edilir. Kurutma işlemini uygulamak için herhangi bir işlem öncesi koşullandırmaya ihtiyaç yoktur. Fakat kurutulmuş arıtma çamuru için kalite kriterleri uygulamaya bağlı olarak değişiklik gösterebilir (EEA, 1998).

Arıtma çamurunun gübre ve /veya yakıt olarak kalitesi genelde aşağıdaki kriterlere göre değişiklik gösterir:

- Organik katıların içeriği
- Bitkilerin kullanabileceği besin içeriği, genel olarak fosfor, potasyum ve azot
- Su emme ve tutma özelliği
- Ağır metal içeriği
- Patojenik bakteri, mantar, virüs içeriği ve toksinler
- Patojenik mikro organizmaların tekrar oluşum süresi

Arıtma çamuru içinde patojenlerin bulunma olasılığı önemli bir sorundur. Bu noktada patojenlerin bulunma olasılığını en aza indirmek için düzgün ve doğru kurutma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu işlemde tutma süresi/tutma süresi dağılımı ve sıcaklık, tane (partikül) boyutu ve ısıl geçirgenliği en güvenilir metotlar olarak görülmektedir. Bazı kurutma işlemleri sırasında $\text{NH}_3\text{-N}$ 'in bir kısım kaybedilebilir. Eğer bu durum önemli ve zarar verici ise, kayıp katkı maddelerinin eklenmesiyle giderilebilir.

Kurutucunun gerçek akış diyagramı, kurutucu çeşidi (direk/ indirekt) ve her üründeki kuru katı miktarına (ortalama: %70-90) bağlıdır. Kurutucular arasında farklılıklar vardır. Isı geri kazanımı dolaylı kurutucularla daha etkin olabilirken, direk kurutucularda ısı kayıpları daha çok olmaktadır (R&R, 2010). Değişik kurutma metotları ve teknolojileri arasında en belirgin olanı direkt ve indirekt metotlardır:

İndirekt (dolaylı) kurutucular, kurutulacak maddeye, dolaylı olarak, bir ısı transfer yüzeyi aracılığı ile ısı iletilir. Bu sistemde ısı aracı (ör: buhar, termal yağ) arıtma çamuru ile direk temasta değildir. Oluşan su buharının taşınması için küçük bir hava akımı kullanılabilir. Fakat genel olarak dolaylı kurutucularda hiç hava kullanılmamaktadır. Bu durum koku giderme masrafını en aza indirirken ısı yalıtımını en üst seviyede tutmaktadır. Dolaylı kurutucular arasında sıkça kullanılan sistemlerden biri disk kurutucularıdır. Disk kurutucular yavaş, dönen ekipmanlardır. Bu ekipmanların yapısı basit ve işletilmeleri de kolaydır. Ekipmanın hareketsiz kısmı (stator) kurutulacak maddeyi içine alan neredeyse silindirik, yatay bir davuldan (drum) oluşmaktadır. Davulun içinde, davula bağlı olan ve karıştırıcı görevini yapan sıyrıcı çubuklar mevcuttur. Hareketsiz kısmın üst tarafında, toz ayırıcı ve kaçak buhar toplayıcı bir açıklık bulunur. Kurutucu, genel olarak düşük bir alçak basınç ile çalıştırılır.

Direkt kurutucularda, arıtma çamuru ile buharlaşma sağlayan ve aynı anda su buharını sistemden çıkaran ısıtılmış gaz arasında direk temas vardır. Direkt kurutucularda, kurutmak

için kullanılan gazın ısısı, arıtma çamuruna direkt olarak aktarılmaktadır. Bu işlem gaz ve arıtma çamurunun arasında yoğun bir temas olmasını gerektirmektedir. Direkt kurutucular arasında en sık kullanılan ekipman döner tambur kurutucuları ve akışkan yataklı kurutuculardır.

Döner tambur kurutucularında, arıtma çamuru tamburun bir ucundan konulmaktadır. Dönme faaliyeti ve tamburun iç yapısından dolayı arıtma çamuru tamburun diğer ucuna ulaşmakta ve aynı anda sıcak gazlarla çok yoğun temasa geçmektedir. Son ürün %90 kuru katı oranına sahip granül arıtma çamurudur. Tambur içerisinde tıkanmayı engellemek için sisteme giren arıtma çamurunun kuru katı oranı %65'ten fazla olmalıdır. Bu kıvama ulaşmak için ham arıtma çamurunun daha önce kurutulmuş arıtma çamuruyla karıştırılması gerekmektedir.

Akışkan yataklı kurutucularda yoğun temas sıcak gazların yükselmesi ile sağlanmaktadır. Yükselen gazlar arıtma çamurunu kurutana kadar çalkalayarak taşır. Arıtma çamurunun türüne göre kurutulmuş arıtma çamuru % 90'dan fazla kuru katı oranına sahip, tozdan arınmış, granüller haline dönüşür. Emisyon gazı içerisinde bulunan toz, gaz akımı içerisinde taşınır, siklonlarla ayrıştırıldıktan sonra kurutulmuş atık çamuru ile karıştırılarak tekrar kurutucuya verilir. Gaz ve arıtma çamuru arasında oluşan yoğun temas ve iyi ısı transferi sonucunda direkt kurutucuların spesifik performansları dolaylı kurutuculardan daha iyidir. Ayrıca direkt kurutucular mekanik tasarım olarak daha basittirler (R&R, 2010).

2.3.7 Zirai Kullanım

Arıtma çamurlarının zirai sektörde kullanılmalarının amacı, çamur içinde bulunan maddelerden kısmen fosfor ve azot gibi besleyiciler ile kısmen de organik maddelerin toprağa geçmesini sağlayarak toprağın iyileşmesine katkıda bulunmaktır. Arıtma çamurlarından tarımsal faydalanmanın temel prensibi çamurun tarım arazilerine agronomik oranlarda uygulanmasıdır. Yani yıllık yükleme bazında çamur ile verilen ve ürünlerdeki mevcut N ve /veya P miktarı, ürünün ihtiyacı olan yıllık N ve /veya P miktarını geçmeyecek şekilde çamur yüklemesi yapılmalıdır (Kocaer ve Başkaya, 2001).

Prensip olarak, ilgili ülkenin yasalarında öngörülen kalite tanımına (ağır metaller, patojenler, ön-işleme) uygun olduğu sürece her türlü arıtma çamuru zirai tarım alanları üzerine konulabilir. Çok sık olarak, tarım alanlarında kullanılacak arıtma çamuru miktarı buralarda yetiştirilecek bitkiler için gerekli olan besin maddesi miktarı ve çamur içindeki kuru madde miktarına bağlıdır.

Son yıllardaki genel eğilim çevreci bir yaklaşımla, çamurun tarım alanlarında kullanılarak, bitki besin maddelerinin ve organik maddelerin doğal çevrimine en kısa yoldan sokulması şeklindedir. Arıtma çamurlarının ve organik gübrelerin tarım arazilerindeki faydalı kullanımını belirlemek için, havada kurutulmuş ham çamur, havada kurutulmuş çürük çamur ve çiftlik gübrelerinin bitki besin düzeylerini belirlemiş, bu atıkları tarım alanlarına uygulayarak ürün verimi ve kalitesi üzerinde etkileri incelenmiştir. Arıtma çamurlarının N ve P yönünden yararlı bir kaynak olduğunu ancak potasyum yönünden fakir kaldığını, özellikle sulu haldeki çürütülmüş çamurun bitkiye yarayışlı N ve P bakımından oldukça değerli bir kaynak olduğu vurgulanmıştır (Williams, 2005).

Batı Avrupa ülkeleri ve ABD, tarım alanları için kullanılacak arıtma çamurları ile ilgili yasalara sahiptir. Toprağa verilecek besin maddesi miktarı, Danimarka, İsveç, Hollanda, İsviçre ve ABD’de yasal olarak sınırlandırılmıştır. Norveç, Finlandiya, Almanya, İrlanda, İtalya ve İspanya çamur içindeki kuru madde miktarına sınırlama getirmiştir. Fransa ve İngiltere ise çamur içindeki ağır metal muhtevasını sınırlandırmıştır. Bazı ülkelerde yasalar /yönetmelikler öylesine sıkıdır ki, bu ülkelerde ancak çok düşük miktarlardaki atık çamurlar istenilen özellikleri taşımaktadır (R&R, 2010).

2.3.8 Düzenli Depolama

Arazide depolama, genel olarak çamurun araziye uygulanarak daha sonra üstüne bir toprak katmanının örtülmesi yoluyla gömülmesidir. Çamurun arazide depolama için uygunluğunun belirlenmesinde çamur kaynakları ve arıtma türü belirleyicidir. Çamur üzerinde gerekli analizler yapılır, bu bilgiler değerlendirilerek çamurun depolanması için uygunluğu incelenir. Patojenler, koku ve işletim problemleri nedeniyle her tür atıksu arıtma çamuru arazide depolanmak için uygun olmayabilir.

Sadece susuzlaştırılmış çamurlar (katı madde içeriği %15’ten büyük ya da eşit) arazide depolamak için uygundur. Katı madde içeriği %15’ten küçük olan çamurlar akışkan olduğu için depolanamaz. Katı madde oranı az olan çamurlara toprak eklenmesi durumunda, çamurun tek başına depolandığı alanlara uygun çamur elde edilebilir. Ancak genellikle bu işlemin maliyeti yüksektir. Eğer çamurun arazide depolanması tek seçenekse, arıtma tesisinde çamur susuzlaştırma işleminin yapılması gerekir. Düşük katı madde içerikli çamurlar (katı madde içeriği %3’ten küçük) ancak katı atıklarla birlikte arazide depolanabilir. Genellikle, sadece stabil haldeki çamurların arazide depolanması önerilir. Çeşitli çamurların düzenli depolmaya uygunluğu Çizelge 2.6 da topluca değerlendirilmiştir.

Çizelge 2.6 Arıtma çamurlarının düzenli depolama için uygunluğu (Akça, 2005).

Proses	Çamur tipi	Ayrı Depolama		Katı Atıkla Birlikte Depolama	
		Uygunluk	Sebep	Uygunluk	Sebep
Yoğunlaştırma	Birincil	UD	P, K, İP	UD	P, K, İP
	Biyolojik	UD	P, K, İP	UD	P, K, İP
	Karışık	UD	P, K, İP	UD	P, K, İP
	Çürümüş Birincil	UD	İP	KU	İP
	Çürümüş Karışık	UD	İP	KU	İP
Aerobik Çürütme	Birincil, Yoğunlaştırılmış	UD	İP	KU	İP
	Karışık, Yoğunlaştırılmış	UD	İP	KU	İP
Anaerobik Çürütme	Birincil, Yoğunlaştırılmış	UD	İP	KU	İP
	Karışık, Yoğunlaştırılmış	UD	İP	KU	İP
Yakma	Birincil, Susuzlaşmış	U		U	
	Karışık, Susuzlaşmış	U		U	
Islak Oksidasyon	Birincil veya Karışık	UD	K, İP	KU	K, İP
Kireçle Stabilizasyon	Birincil, Yoğunlaştırılmış	UD	İP	KU	İP
	Karışık, Yoğunlaştırılmış	UD	İP	KU	İP
Susuzlaştırma		U		U	
Kurutma yatakları	Bütün çamurlar	U		U	
Mekanik susuzlaştırma	Çürütülmüş	U		U	
	Kireçle stabilize	U		U	
	Çürütülmüş ve Kireçle Stabilize	U		U	
Isı ile kurutma	Çürütülmüş	U		U	

U:Uygun, UD: Uygun değil, KU: Kısmen uygun, P: Patojen problemi, K:Koku, İP: İşletme problemi

Arıtma çamurlarının düzenli depolanmasında uygulanan başlıca yöntemler şunlardır:

- Sadece çamurun depolandığı hendekler: Dar ya da geniş hendekler
- Sadece çamurun depolandığı alanlar: Yığın depolama, tabakalı depolama
- Katı atıkla birlikte depolama: Çamur/çöp karışımı, çamur/toprak karışımı

Herbir metod için önerilen kriterler, geniş bir aralıktaki çamur ve arazi koşullarını kapsayan deneyimlere dayanmaktadır. Bu kriterler çamur depolama uygulamalarının büyük çoğunluğu için geçerlidir. Bu kriterlere göre yapılan işlemin doğru çalışacağından emin olmak için, pilot ölçekli testlerin yapılması önerilir.

Çamur hendeklerinde depolamada yapılan işlem, çamurun toprakta açılan hendeklere gömülmesidir. Bunun için, toprak kazılarak hendekler açılır. Hendek uygulamalarında toprak yalnızca çamuru örtmek için kullanılır. Çamur doğrudan hendeğin içine dökülür. Çamurun üst örtüsünün sıklığı sayesinde koku kontrolü sağlanır. Bu nedenle diğer metodlara göre kanal metodu stabil halde olmayan ya da düşük stabilitedeki çamurlar için daha uygundur.

Çamur hendekleri, dar ve geniş hendekler olarak ikiye ayrılır. Dar hendeklerin genişliği 3m den az, geniş hendeklerin ise genişliği 3m den fazladır. Hendek genişlikleri ise birkaç faktöre bağlıdır. Bunlar yer altı suyu seviyesi, kaya tabakası derinliği, şev stabilitesidir.

2.3.9 Yakma

Günümüzde, arıtma çamurlarının en son bertaraf yöntemi olarak uygulanan yakma yöntemi, Avrupa'da arıtma çamurlarının toplam kütlelerinin yaklaşık % 15 kadarına uygulanmaktadır (R&R, 2010). Bu uygulamada arıtma çamurları ya tek başlarına, ya da diğer atıklarla birlikte yakılmaktadır.

Arıtma çamurlarının doğrudan zirai amaçlı olarak kullanılması veya düzenli depolama sahalarına gönderilerek bertaraf edilmesi giderek artan yasal kontrollere tabi olmaktadır. Bu nedenle, yakma sistemlerindeki yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına, yakma kriterlerinin sıklığına, emisyon gazlarının işlenmesi ile ilgili maliyetlerin artmasına ve uçucu küllerle yanma ürünü olarak ortaya çıkan küllerin bertarafı işlemlerinin zorlaşmasına rağmen, arıtma çamurlarının yakılarak bertaraf yönteminin giderek daha fazla kullanılacağı beklenmektedir.

Arıtma çamurlarının yakılması işlemi ya doğrudan bu atıkları yakmak üzere kurulmuş olan yakma tesislerinde ya da diğer evsel atıkların da yakıldığı yakma tesislerinde gerçekleştirilebilir. Arıtma çamurlarını diğer atıklarla birlikte yakan tesislerde, arıtma çamurlarındaki organik maddenin yakılmasından kaynaklanan sınırlamalara uyum gösterilir.

Ön kurutma işlemi yapıldıktan sonra, arıtma çamurları, yüksek kalorifik değere sahip oldukları için, çimento fırınları içinde de yakılabilir. Bu durumda çamur içindeki kirleticiler de klinker içinde stabilize edilmiş olur. Ekonomik açıdan durum değerlendirilmesi yapıldığında, bu uygulamaların zirai amaçlı olarak kullanılamayan veya diğer evsel atıklarla birlikte yakılamayan çamurlar için düşünülmesi gerektiği anlaşılr.

2.4 Arıtma Çamuru Bertaraf Metotlarının Mukayesesi

Atıksu arıtma tesislerinden açığa çıkan çamurlar, arazide zirai maksatlı kullanma, çöp sahalarına gömme, kurutma, yakma ya da kompostlaştırma yöntemleri ile bertaraf edilebilir.

Aritma çamurlarının düzenli depolama metoduyla bertarafı gelişmekte olan ülkelerde en tercih edilir yöntem olarak görünmektedir. Ancak depolama sahalarına getirilen ham çamurunun katı madde muhtevasının yönetmeliklerde belirlenen değerlerden az olması, depolama sahalarına getirilen arıtma çamurlarının kolay ve uygulanabilir bir şekilde depolanabilmesi için uygun malzemelerle karıştırılması(*toprak, kil zeolit v.b.*) alan ihtiyacını daha da arttırmaktadır. Ayrıca toz, haşere, sinek oluşumundan dolayı çevresel ve sağlık riskleri de oluşmaktadır.

Aritma çamurlarının katı atıklarla (çöp) birlikte karıştırılarak depolanması bir alternatif olarak görülse de, depolama alanlarında çamurunun akışkanlığı nedeniyle tutulamaması, ekipmanların çalıştırılması esnasında kayması ve çamura saplanması gibi sorunlarla karşılaşıldığından pek tercih edilmemektedir. Düzenli depolama ile ilgili getirilen yasal sınırlamalar, işletmede yaşanan sıkıntılar, alan ihtiyacı ve gittikçe artan işletme maliyetlerinden dolayı; arıtma çamurlarının bertarafında depolama artık tercih edilen bir yöntem olmaktan çıkmaktadır.

Aritma çamurlarının yakılması alternatifi, yakma esnasında oluşan emisyonların standartlara uygun olarak havaya verilmesi için büyük oranlarda ilave masraflar gerektirmesi ve sistemin işletilmesindeki zorluklar sebebiyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde ilk planda tercih edilmemektedir. Ancak AB Direktiflerinde biyolojik olarak parçalanabilen atıkların düzenli depolama alanlarında bertarafına getirilen kısıtlar, çamurların yakılmasını gerektirebilir. Arıtma çamurları yanında tehlikeli atıklar da her geçen yıl gelişen endüstri ve artan nüfusa bağlı olarak katlanarak artmaktadır.

Aritma çamurlarının kurutularak bertaraf edilmesi de hacimde büyük miktarlarda azalmaya neden olacağı, elde edilecek son ürünün ek yakıt olarak kullanılabileceği açısından bakıldığında, Türkiye koşullarında tercih edilebilir bir bertaraf teknolojisi olarak görülmektedir. Ancak kurutma için gerekli olan ısı enerjisinin, işletme maliyetinin büyük bir kısmını oluşturması tercih konusunda düşünülmesi gereken bir noktadır.

Maliyet karşılaştırmaları yaparken girdi olarak kullanılan arıtma çamurundan beklenen kalitenin ve dolayısıyla ön işleme maliyetlerinin bir yöntemden diğerine değişebileceğini düşünmek gerekir. Arıtma çamurunun bertarafı için uygulanacak metodların karşılaştırmalı avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.7 de özetlenmiştir.

Bertaraf metodunun seçiminde arıtmanın türüne bağlı olarak oluşan çamurun evsafi ve yerel şartların önemi büyüktür. Yürürlükteki yasal mevzuat dikkate alınarak kullanılacak bertaraf metodunun işletilebilirliği ve maliyeti analiz edildikten sonra bertaraf sistemleri seçilmelidir.

Çizelge 2.7 Arıtma çamuru bertaraf metotlarının avantaj ve dezavantajları (İSTAÇ, 2010).

Bertaraf Metodu	Avantaj	Dezavantaj
Zirai Kullanım	- Atık çamur içindeki besleyici maddelerin kullanılması: fosfor ve azot gibi - Toprağın humus tabakasını iyileştirmek maksadı ile arıtma çamurunun içindeki organik maddelerin kullanılarak toprağın iyileştirilmesi - Uygulama aşamasında uyulacak yasak düzenlemeler biliniyor - Genel olarak çamur bertarafının en ucuz yöntemidir	- Bir yıl içinde arıtma çamuru tarım arazisi üzerine ancak belirli miktarda serilebildiği için çamur depolama tesisleri için önemli yatırımların yapılması gerekir - Çiftçilere olan bağımlılık, oldukça çok sayıda idari anlaşmanın yapılmasının gerekliliği ve uygulamacılar tarafından kabul görmesi - Arıtma çamuru içinde bulunan organik mikro kirletici muhtevası ve bunların yiyecek zincirine yapacakları etkiler konusunda bilgi düzeyinin yetersiz oluşu - Tam olarak yasal uyum kontrolü yapılmasının güçlüğü
Kompostlaştırma	- Tarım arazilerine serilmek üzere taşınacak malzemelerin hacimlerinde azalma olur. - Nihai ürünün depolanabilir olması - Nihai ürünün potansiyel olarak satılma olanağının olması - Kompostlaştırma prosesinin diğer sistemlerle kombine edilir olması - Yakmaya göre daha düşük maliyet gereksinimi - Zirai uygulamadan önce ürünün hijyenliği sağlanır - Ürünün daha az su ihtiva etmesi nedeni ile araziye serilmesi daha kolay olur - Arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasının katı atıkların kompostlaştırılmasına göre avantajları; - Arıtma çamurlarının kompostlaştırılması katı atıklardaki gibi ayırma veya parçalama gerektirmez. - Arıtma çamurları genellikle daha uniform bir yapıdadır ve daha az işletme problemi vardır. - Nihai ürün plastik, cam, metal gibi maddeler içermediğinden pazarlama için daha uygundur.	- Kompostlaştırma prosesinde %18-30 arası susuzlaştırılmış çamura ihtiyaç duyulması - Gözenekliliğin artması için ilave materyallere ihtiyaç duyulması - Fazla yer gereksinimi - İşleme maliyeti arıtma çamurunun ham olarak serilmesine göre daha fazladır - Havalandırma enerji sarfiyatına neden olur - Potansiyel koku ve biyoaerosol oluşumu - Kompostun nihai ürün olarak kullanılması için bir ihtiyacın olması gerekir - Üründe bazı patojenlerin kalması riski, - Üründe metal konsantrasyonu, stabilite ve olgunluk açısından stabilitenin sağlanamaması riski.
	Optimum C/N oranını temin etmek için arıtma çamurunun, diğer atıklarla (işlem görmesi gereken diğer atıkların mevcut olması halinde) karıştırılması avantaj olabildiği gibi bu atıkların satın alınmasının zorunlu olması halinde bir dezavantaja dönüşebilir	

Kurutma	• Arıtma çamurunun hacminde büyük miktarlarda azalmaya neden olmakta • Depolanabilen ve hijyenik bir ürün üretilmekte • Hacimdeki büyük azalmadan dolayı kuru arıtma çamuru nakliye, işleme ve depolama maliyetlerini önemli ölçüde azaltmakta • Son ürünün pazarlanabilme olasılığı yüksek • Tarım ve ormancılıkta gübre olarak kullanılması. • Çimento tesislerinde, enerji tesislerinde ve yakma tesislerinde ek yakıt olarak kullanılması • Üst toprak peyzajı, dolgu ve düzenli depolama için kullanılması.	• Harcanan enerji açısından bakılırsa bir kütleden suyun, buharlaştırma/kurutma yöntemiyle çıkarılması başka mekanik metotlarla karşılaştırıldığında (sıkıştırma ve santrifüj) maliyeti genel olarak daha yüksektir. • Granül üretme işlemini içeren kurutma tesisleri diğer metotların çoğuna göre daha fazla mali yatırım gerektirmekte • Çamur kurutma için gereken ısı enerjisi maliyeti işletme maliyetinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.
Yakma	• Yanmadan sonra arıtma çamuru hacminde önemli azalma meydana gelir(Yakmadan sonra elde edilen hacim azalması yakılan arıtma çamurunun organik madde içeriği ile bağlantılıdır. Yakma, arıtma çamurunun hacmini %25-50 arasında azaltır) • Arıtma çamurlarından enerji olarak yararlanılmış olur • Arıtma çamurunun yakılmasından sonra ortaya çıkan yan ürünlerin geri dönüşüm gayesi ile kullanılması mümkündür (asfalt yollarda dolgu maddesi, beton üretimi ve tuğla yapımı) • Bu proses çamur kompozisyonuna fazla hassas değildir • Güvenilir (bilinen / uygulanan) sistemlerdir • Sitemin kapalı olması ve yüksek sıcaklıklar nedeni ile kokular minimize edilir.	• Yakma tesisleri yatırım maliyetleri yüksek işletmelerdir. Bunlar ancak büyük hacimlerin bertarafı için uygundur. 2000 ile 2500 ton susuzlaştırılmış çamur işleyecek tesisler söz konusudur. Bu yüksek kapasiteler emisyon gazlarının temizlenmesindeki kompleks yapıdan ve işletme veriminden dolayı önemlidir.
Düzenli Depolama	• Maliyeti diğer bertaraf sistemlerine göre nispeten daha az • Uygulama ve işletmesi nispeten kolay (Ham arıtma çamurunun toprak, kil v.b. yardımcı malzemelerle belirli bir katı konsantrasyonuna getirilmesinden sonra. Ancak buda alan ihtiyacını artırıyor.)	• Çevresel ve sağlık riskleri : - İşletme sırasında araçlardan kaynaklanan gürültü ve toz kirliliği - Koku, haşere, fare vb zararlıların üremesi • Fazla alana ihtiyaç olması • Çok fazla üst üste depolama imkanının olmaması • Katı atıklarla birlikte depolamanın zor ve uygun sonuçlar vermemesi • Kapatılan alanın yeniden kullanılamaması • Depolama sahasına gönderilecek atık miktarı ve cinsinin yönetmeliklerle sıkı bir şekilde kısıtlanmış olması

2.5 Arıtma Çamurlarının Bertaraf Maliyetleri

Maliyet açısından en uygun bertaraf sistemi, sırasıyla; zirai kullanım, kompostlaştırma ve düzenli depolama olarak görünmektedir. Yakma tesisi tecrübe gerektiren, işletmesi zor, yatırım ve işletme maliyeti yüksek bir bertaraf alternatifi olarak görünmektedir. Kurutma ile arıtma çamurlarının bertarafında ise arıtma çamurlarını kurutacak ısı enerjisinin maliyeti işletme maliyetinin büyük bir kısmının oluşturmaktadır.

Arıtma çamurunun bertaraf şekline bağlı olarak oluşabilecek yaklaşık maliyetler Çizelge 2.8 de özetlenmiştir.

Çizelge 2.8 Çamur bertaraf metodlarının maliyet analizi (İSTAÇ, 2010).

Bertaraf Metodu	Maliyet tahmininde dikkate alınan şartlar (Türkiye koşulları dikkate alınmıştır.)	Maliyet
Zirai Kullanım	İşletme Maliyeti: - Geçici depolama - Çamurun araziye serilmesi - Çamurun kalitesinin belirlenmesi için yapılması zorunlu analizlerin maliyeti	10 - 15 \$/ton
Kompostlaştırma	Yatırım Maliyeti: (100 ton/gün'lük bir tesis için yaklaşık olarak) İşletme Maliyeti: (Tesisin işletme giderleri (personel, enerji, karıştırmada kullanılan ekipmanla giderleri, bakım, idari giderler, vergiler, kalite kontrol masrafları).	4.000.000 - 6.000.000 \$ 20 - 40 \$/ton
Kurutma	İşletme maliyeti: (Seçilecek olan kurutma şekline ve nihai ürünün özellikleri göre yatırım maliyeti değişmektedir).	45-60 \$/ton
Yakma	Yatırım maliyeti: (1000 ton/gün' lük bir tesis için yaklaşık olarak) İşletme maliyeti:	150.000.000 \$ 90-130 \$/ton
Düzenli Depolama	Yatırım maliyeti: 1 ha (10.000 m ²) saha hazırlaması. İşletme maliyeti: Ham çamurun karıştırılacağı malzemelerin (toprak, kil, v.s.) temini, saha içi nakliyeler. Saha içi ekipmanın işletme giderleri.	800.000 – 1.500.000 \$ 25-35 \$/ton

Arıtma çamurunun işlenmesine ilişkin kararda maliyet önemli bir kriterdir. Maliyetler, yerel şartlara ve işleme tesisinin büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Arıtma çamurunun işlenmesi ve bertarafı ile ilgili değişik seçeneklerin doğru bir karşılaştırmasını yapabilmek için üç ana faktörden etkilenen yıllık maliyetleri ele almak gerekir.

İlk olarak, toplam yatırım miktarına, finansman metoduna, amortisman süresine ve borç alınan miktarın faiz oranlarına bağlı olan yıllık yatırım maliyetleri gelir. İkinci sırada enerji, kimyasal madde, bakım, personel maaşları, vergi ve sigortadan oluşan işletme maliyetleri yer alır. Üçüncü olarak da kalıntı veya son ürünün tekrar kullanımına bağlı maliyetler gelir. Maliyetler, arıtma çamurunu işleme tesisinde veya proseste yer alan daha sonraki aşamalarda ortaya çıkar.

Çamur bertaraf maliyetleri, bertaraf metotlarına bağlı olarak değişmektedir. Avrupa ülkelerinde, arıtma çamurlarının araziye serme yerine diğer tekniklerin kullanılması durumundaki bertaraf maliyetleri Çizelge 2.9 da verilmiştir.

Çizelge 2.9 Avrupa ülkelerinde çamur bertaraf maliyetleri (EC, 2008).

Ülke	Düzenli Depolama, (€/ton-kuru madde)	Birlikte Yakma, (€/ton-kuru madde)	Tekli Yakma, (€/ton-kuru madde)
Avusturya	124	146	222
Belçika	130	152	233
Danimarka	163	183	286
Finlandiya	146	167	258
Fransa	130	152	233
Almanya	122	145	220
Yunanistan	111	135	202
İrlanda	148	169	261
İtalya	124	146	222
Lüksemburg	136	157	242
Hollanda	121	144	218
Portekiz	104	128	190
İspanya	114	137	206
İsveç	133	155	238
İngiltere	117	140	211
Bulgaristan	64	91	126
Kıbrıs	107	131	195
Çek Cumhuriyeti	87	113	163
Estonya	93	118	172
Litvanya	81	107	154
Malta	94	119	174
Romanya	76	102	145
Slovakya	85	111	160
Slovenya	99	124	183

3. TÜRKİYE VE AVRUPA BİRLİĞİNDE ÇAMUR YÖNETİMİ İLE İLGİLİ YASAL MEVZUAT VE GENEL DURUM

Ulusal mevzuatta ve Avrupa birliği direktiflerinde arıtma çamurları ile ilişkili doğrudan veya dolaylı pek çok yasal düzenleme vardır. Arıtma çamurlarının yönetimi konusunda Avrupa ülkeleri önemli ölçüde ilerleme kaydetmelerine rağmen, ülkemizde bu konu ile ilgili ciddi sıkıntılar yaşanmaktadır. Türkiyede ve Avrupa Birliği(AB)'nde konu ile ilgili düzenlemeler Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çamur yönetimiyle ilgili yasal mevzuatlar.

	Mevzuat No	Mevzuat İsmi
Ulusal Mevzuatlar	1991/ 20814	Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
	2004/ 25377	Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğine Karşı Suların Korunması Yönetmeliği
	2004/ 25687	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
	2005/ 25755	Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
	2008/26927	Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik
	2010/27533	Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
	2010/27605	Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik
	2010/27661	Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik
AB Direktifleri	86/278/EEC	Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Tarımda Kullanılması
	91/271/EEC	Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi
	99/31/EEC	Düzenli Depolama Direktifi
	91/689/EEC	Tehlikeli Atıklar Direktifi
	91/676/EEC	Tarımdan Gelen Nitrat Kirliliğine Karşın Suların Kor. Direktifi
	200/60/EC	Su Çerçeve Yönergesi
	2006/12/EC	Atık Çerçeve Direktifi

3.1 Ulusal Mevzuat

3.1.1 Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (Mart 1991/20814)

Katı atık kontrol yönetmeliğinin amacı; her türlü atık ve artığın çevreye zarar verecek şekilde, doğrudan veya dolaylı bir biçimde alıcı ortama verilmesi, depolanması, taşınması, uzaklaştırılması ve benzeri faaliyetlerin yasaklanması, çevreyi olumsuz yönde etkileyebilecek olan tüketim maddelerinin idaresini belli bir disiplin altına alarak, havada, suda ve toprakta

kalıcı etki gösteren kirleticilerin hayvan ve bitki nesillerini, doğal zenginlikleri ve ekolojik dengeyi bozmasının önlenmesi ile buna yönelik prensip, politika ve programların belirlenmesi, uygulanması ve geliştirilmesidir.

3.1.2 Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik (Haziran 2010/27605).

Yönetmeliğin amacı; alıcı ortam olarak toprağın kirlenmesinin önlenmesi, kirlenmenin mevcut olduğu veya olması muhtemel sahaları ve sektörleri tespit etmek, kirlenmiş toprakların ve sahaların temizlenmesi ve izlenmesi esaslarını sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde belirlemektir.

3.1.3 Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğine Karşı Suların Korunması Yönetmeliği (Şubat 2004/25377)

Yönetmeliğin amacı, tarımsal kaynaklı nitratin suda neden olduğu kirlenmenin tespit edilmesi, azaltılması ve önlenmesidir. Bu yönetmelik, yer üstü suları ve topraklarda kirliliğe neden olan azot ve azot bileşiklerinin belirlenmesi, kontrolü ve kirliliğin önlenmesi ile ilgili teknik ve idari esasları kapsar.

Yönetmelik gereği Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı, Çevre ve Orman Bakanlığı, Sağlık Bakanlığı ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca, suyun ve toprağın fiziksel ve çevresel özellikleri ile azot bileşiklerinin suda ve topraktaki miktarları dikkate alınarak;

a) 50 mg/l den fazla nitrat içeren ve önlem alınmadığı takdirde içerebilecek olan, içme suyu amacıyla kullanılan ya da kullanılabilecek kalitede olan tüm yüzey suları ve yeraltı suları,

b) Doğal tatlı su gölleri, diğer tatlı su kaynakları, haliçler, kıyı suları ve deniz sularının

ötrofik olup olmadığını ya da önlem alınmazsa yakın gelecekte ötrofik hale gelip gelmeyeceği, tespit edilir.

3.1.4 Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (Aralık 2004/25687)

Yönetmeliğin amacı, ülkenin yeraltı ve yerüstü su kaynakları potansiyelinin korunması ve en iyi bir biçimde kullanımının sağlanması için, su kirlenmesinin önlenmesini sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde gerçekleştirmek üzere gerekli olan hukuki ve teknik esasları belirlemektir. Bu düzenleme ile, arıtma çamurlarının direkt verilmesi halinde kirlenmesi muhtemel olan yeraltı suları, denizler ve diğer alıcı su ortamları korunmakta ve buralarda direkt boşaltım yasaklanmaktadır.

3.1.5 Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (Mart 2005/25755)

Bu Yönetmeliğin amacı, tehlikeli atıkların, üretiminden nihai bertarafına kadar;

- a) İnsan sağlığına ve çevreye zarar verecek şekilde doğrudan veya dolaylı biçimde alıcı ortama verilmesinin önlenmesine,
- b) Üretiminin ve taşınmasının kontrolünün sağlanmasına,
- c) İthalinin yasaklanmasına ve ihracatının kontrolüne,
- d) Yönetiminde gerekli teknik ve idari standartların sağlanmasına,
- e) Üretiminin kaynağında en aza indirilmesine,
- f) Üretiminin kaçınılmaz olduğu durumlarda, üretildiği yere en yakın mesafede bertaraf edilmesine,
- g) Yeterli bertaraf tesisi kurulması ve bu tesislerin çevresel bakımdan sağlıklı bir şekilde kontrolüne,
- h) Çevreyle uyumlu yönetiminin sağlanmasına,

yönelik prensip, politika ve programların belirlenmesi için hukuki ve teknik esasları kapsar.

Bu yönetmelikle, tehlikeli atık grubuna giren arıtma çamurlarının nasıl ara depolanacağı, taşınacağı ve bertaraf edileceğine ilişkin prensipler belirlenmiştir.

3.1.6 Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (Temmuz 2008/26927)

Atıkların oluşumundan bertaraflarına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetimlerinin sağlanmasına yönelik genel esasların belirlenmesi amaçlanmıştır. Yönetmelik ekinde tehlikeli ve tehlikesiz atıkları belirleyen ve Avrupa Birliği ile uyumlu atık listesi yer almaktadır. Atık listesinde arıtma çamurları üretildikleri atık kaynağına göre tehlikeli ve tehlikesiz olarak sınıflandırılmıştır.

3.1.7 Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (Mart 2010/27533)

Düzenli depolama tesislerine ilişkin teknik esaslar ile atıkların düzenli depolama tesislerine kabulü ve atıkların düzenli depolanmasına ilişkin usul ve esaslar ile alınacak önlemleri, yapılacak denetimleri ve tabi olunacak sorumlulukları kapsamaktadır. İlgili yönetmelikte, Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliğin EK-IV'ünde tehlikesiz olarak sınıflandırılan arıtma çamurları, yönetmeliğin Ek-2'de verilen diğer tüm parametreleri sağlaması, ağırlıkça en az %50 kuru madde ihtiva etmesi, ön işleme tabi tutularak kötü kokunun giderilmesi ve atığın kararlı hale getirilmesi kaydıyla, II. Sınıf düzenli depolama alanına (belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis) kabul edilebileceği belirtilmektedir.

3.1.8 Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (Ağustos 2010/27661)

Yönetmeliğin amacı, arıtma çamurlarının toprakta kullanımında gerekli tedbirlerin alınması esaslarını sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde belirlemektir. Yönetmelik evsel ve kentsel atıksuların arıtılması sonucu ortaya çıkan arıtma çamurlarının toprağa, bitkiye, hayvana ve insana zarar vermeyecek şekilde, toprakta kontrollü kullanımına ilişkin teknik ve idari esasları kapsamaktadır. İlgili yönetmelikte ham çamurun toprakta kullanılması yasak olup; stabilize arıtma çamurlarının toprakta kullanılması izne tabidir. Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nin 10 uncu maddesi gereğince verilen "Stabilize Arıtma Çamuru Kullanımı İzin Belgesi" izin süresi bitimine kadar geçerli olup, tekrar Stabilize Arıtma Çamuru Kullanımı İzin Belgesi almak isteyen özel ve resmi kuruluşlar yönetmeliğe göre başvuruda bulunmak zorundadırlar. Yönetmelik Ek 1-B, 1-C ve 1-D' de belirtilen toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurlarına ait sınır değerler Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurlarına ait sınır değerler.

Ağır Metal (Toplam)	Sınır Değerler (mg/kg kuru madde)
Kurşun	750
Kadmiyum	10
Krom	1000
Bakır	1000
Nikel	300
Çinko	2500
Civa	10
Organik Bileşikler	Sınır değerler (mg/kg kuru madde)
AOX (Adsorblanabilen organik halojenler)	500
LAS (Lineer alkilbenzin sülfonat)	2 600
DEHP (Diftalat(2-ethylhexyl))	100
NPE (Nonil fenol ile 1 ve 2 etoksi grubu olan nonil fenol etoksilatların toplamını içerir)	50
PAH (Polisiklik aromatik hidrokarbon veya poliaromatik hidrokarbonların toplamı)	6
PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180 sayılı poliklorlu bifenil bileşiklerinin toplamı)	0.8
Dioksinler	ng Toksik Eşdeğer/kg kuru madde
PCDD/F Poliklorlu dibenzodioksin/dibenzofuranlar	100
Arıtma çamuruna uygulanan stabilizasyon yöntemi sonucunda E. Coli'nin en az 2 Log10 (% 99) indirgenmesi sağlanmalıdır	

3.2 AB Direktifleri

3.2.1 Arıtma Çamuru Direktifi (86/278/EEC)

Bu direktifin amacı, evsel nitelikli arıtma çamurunun kullanılmasını teşvik ederken, bu atığın toprak, bitkiler, hayvanlar ve insanlara zarar vermesini önleyecek düzenlemeler getirmektir. Çamurun faydalı tarımsal özellikleri olabilmesi dolayısıyla doğru kullanımın teşvik edilmesinin yanısıra, bu kullanımın toprak ve tarımsal ürün kalitesini olumsuz etkilememesi sağlanmalıdır. Bazı ağır metaller, bitkiler üzerinde dolayısıyla üründe zehir etkisi gösterebilmektedir. Dolayısıyla bu düzenleme ile toprağa uygulanacak olan çamur içindeki ağır metallere sınırlamalar getirilmiştir. Bu metallerin topraktaki varlığı bu sınırların üstüne çıktığı takdirde çamur kullanımı yasaklanmaktadır. Direktifte verilen limit değerler Çizelge 3.3’ de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Arıtma çamuru direktifi limit değerleri.

Parametre	Uygulanacak Topraktaki Limit Değerler (mg/kg KM)	Atık Çamurdaki Limit Değerler (mg/kg KM)
Kadmiyum	1-3	20-40
Bakır	50-140	1000-1750
Nikel	30-75	300-400
Kurşun	50-300	750-1200
Çinko	150-300	2500-4000
Civa	1-1,5	16-25
Krom	1-1,5	-

3.2.2 Düzenli Depolama Direktifi (99/31/EC)

Düzenli Depolama Direktifi’nin amacı, düzenli depolama sürecinde oluşan emisyonların, havaya, toprağa, yüzey sularına, yeraltı sularına, nihayetinde insan sağlığına olumsuz etkilerini önlemek veya azaltmak amacıyla düzenli depolama ihtiyacını en aza indirmektir.

Katı atıkların ve arıtma çamurlarının düzenli depolanmasını kapsayan direktif, katı atık düzenli depolama sahası tabanının geçirimsiz olmasını, dizayn, işletme, takip ve bakımını şart koşmaktadır. Direktifler, üye ülkelerin belirtilen hedeflere ulaşabilmesi için düzenli depolamadan önce atıkların işlenmesi, ön-bertaraf işlemlerine tabi tutulması (tehlikeli ve tehlikeli olmayan atığın ayrılması), sahanın denetlenmesi ve bakımı gibi çeşitli koşulları öngörmektedir.

Düzenli depolama direktifi, 1995 yılında evsel katı atıklarının %80'inden fazlasını düzenli depolayan üye devletlere, biyolojik olarak ayrıştırılabilen evsel katı atıkların azaltma hedefini:

- 2010 yılında, 1995 yılında oluşan biyolojik olarak ayrışabilen atıkların %75'i,
- 2013 yılında, 1995 yılında oluşan biyolojik olarak ayrışabilen atıkların %50'si,
- 2020 yılında, 1995 yılında oluşan biyolojik olarak ayrışabilen atıkların %35'i

olarak belirlemiştir.

3.2.3 Tehlikeli Atıklar Direktifi (91/689/EEC)

Direktifin başlıca amacı, tehlikeli atığın ortak bir tanımını oluşturmak ve bu atıkların yönetimini diğer atıkların yönetimiyle uyumlu hale getirmektir. Bir atığın tehlikeli atık olarak nitelendirilmesinde; toksik, korozif, alerjik, kanserojen, mutojen özellikleri ile enfeksiyon, tahriş ve gebelik problemlerine yol açma gibi sağlıkla ilgili unsurlar etkilidir. Eko-toksosite, yanıcılık ve patlayıcılık da atığın, tehlikeli atık olarak değerlendirilmesindeki kriterlerdendir.

Bazı atıksuların yapısında ihtiva ettiği tehlikeli maddeler nedeniyle arıtma çamurları da tehlikeli atık sınıfına girmektedir. Dolayısıyla bu atıkların depolanması ve bertarafı tehlikeli atıkların yönetimi esasları dikkate alınarak yapılması gerekmektedir.

3.2.4 Kentsel Atıksu Direktifi (91/271/EEC)

1991 yılında yayınlanan kentsel atıksu direktifi ile, evsel ve evsel nitelikli endüstriyel atıksuların neden olduğu kirliliğin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Kirliliğe karşı yerinde müdahale ve önlem alınması politikası üzerine hazırlanan direktifle, arıtma tesislerinin ve çıkış suyunun kontrolü sağlanmaktadır.

3.2.5 Tarımdan Gelen Nitrata Karşın Toprağın Korunması Direktifi (91/676/EEC)

Tarımsal kaynaklı nitrat kirliliğinin önüne geçilerek, nitrat kalite standartlarının sağlanması amaçlanmaktadır. Direktife göre; yer altı ve yüzey suları için nitrat kirliliğinin 50 mg/l'yi aşmamalıdır.

3.2.6 Atık Çerçeve Direktifi (2006/12/EC)

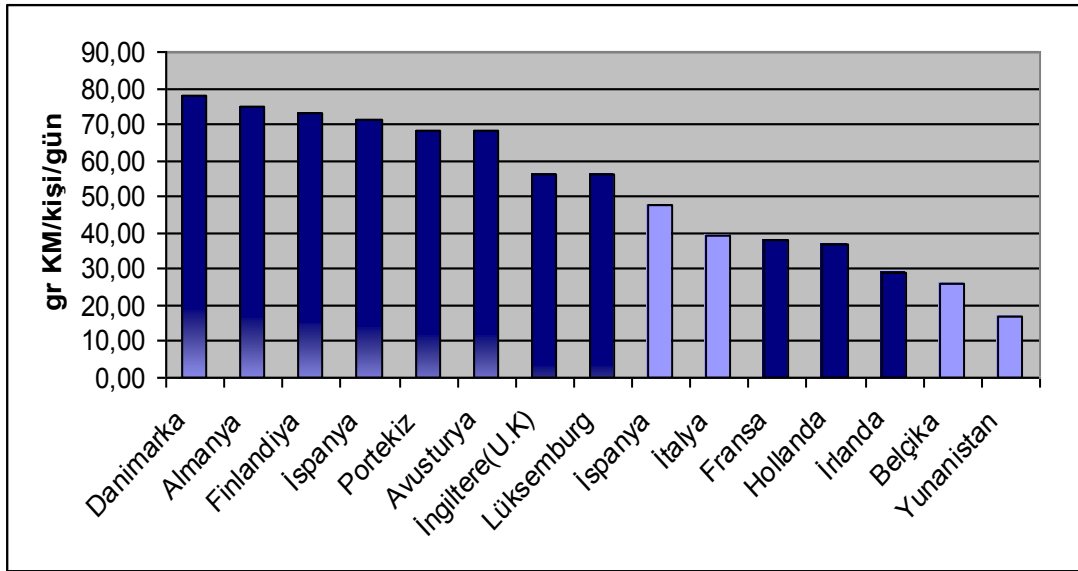
Bu direktifin temel prensibi, atık yönetiminin önleme, geri kazanım ve bertaraf hiyerarşisinde ilerlemesinin sağlanmasıdır. Bu direktifle, atıkların geri dönüşümünün veya hava, su ve toprağa zarar vermeden, koku ve ses gibi rahatsızlık yaratmadan ve kırsal çevreyi temin edecek şekilde bertarafının sağlanması için gerekli önlemlerin alınmasını vurgulamaktadır.

3.2.7 Su Çerçeve Direktifi (2000/60/ EC)

Bu direktifin amacı, sucul ekosistemlerin korunması ve geliştirilmesi, sürdürülebilir su kullanımının teşvik edilmesi ve sel ve kuraklık etkilerinin önüne geçilmesidir. Suların korunmasına entegre bir yaklaşım getiren bu direktifle, tüm kara ve kıyılardaki suların 2015 yılı itibarıyla “iyi durum” seviyesine ulaşması hedeflenmektedir.

3.3 Arıtma Çamurları ile İlgili Avrupa Birliğinde Genel Durum

Avrupa Birliği ülkelerinde günde üretilen kişi başı çamur miktarları gr kuru madde (gr KM) olarak Şekil 3.1’de görülmektedir. Bu veriye göre, Yunanistan 15,4 gr ile en düşük, Danimarka ise 78 gr ile en yüksek kişi başı çamur üretimine sahiptir.



Şekil 3.1 AB üye ülkelerinde kişi başına çamur üretim miktarları (EC, 2001).

Avrupa birliğindeki 27 ülkede (EU 27) evsel atıksu arıtma çamuru üretim miktarları, tarımda kullanım oranları ve gelecekteki çamur üretimine yönelik tahminler Çizelge 3.4 te verilmiştir. Yirmi yedi Avrupa Birliği (EU 27) üye ülkesinde toplam üretilen atıksu arıtma çamuru miktarı yaklaşık 10 milyon ton kuru maddedir. Çamur miktarı genellikle ton kuru madde olarak verilmektedir. Ham çamur miktarını bulmak içinse kuru madde miktarı 10 ile çarpılabilir. Dolayısıyla EU 15 ülkelerinde üretilen ham çamur miktarı 100 milyon ton civarındadır. Bu miktar genel bir yaklaşım olup, çamurun su muhtevası ve işleme şekline bağlı olarak değişmektedir.

Çizelge 3.4 EU 27 ülkelerinde çamur üretim miktarları, çamurun tarımda kullanım oranları ve gelecekteki çamur üretim tahminleri (EC, 2008).

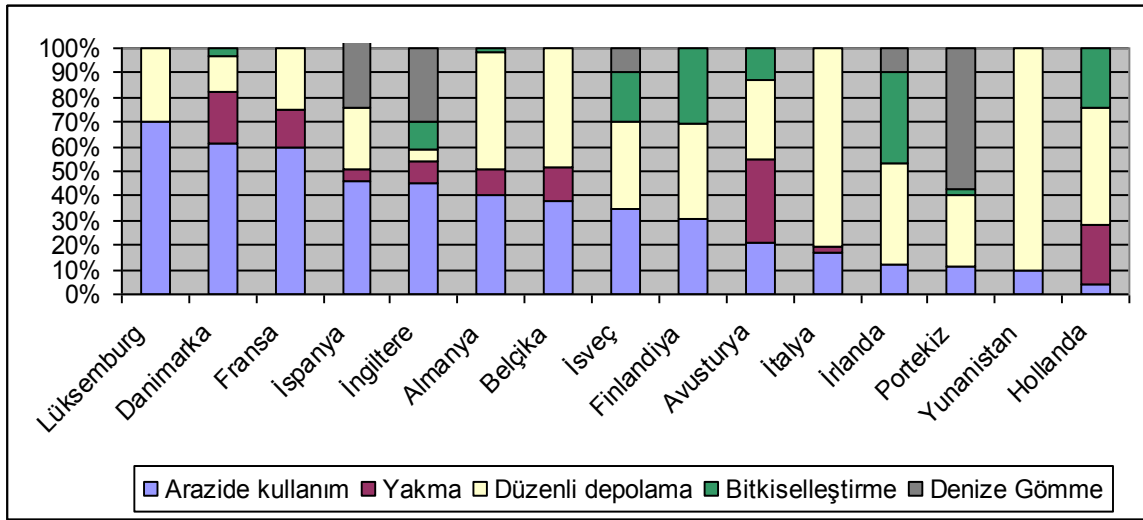
Ülke	Yıl	Çamur Üretimi, (tKM)	Miktar (t KM)	Tarım alanlarında kullanım	
				Toplam çamur üretimindeki oran (%)	2020 yılı çamur üretim tahmini, (tKM/yıl)
Avusturya	2005	252.800	47.190	16	280.000
Belçika	2007	136.260	10.927	35	166.000
Danimarka	2002	140.021	82.029	59	140.000
Finlandiya	2005	147.000	4.200	3	155.000
Fransa	2007	1.125.000	787.500	70	1.600.000
Almanya	2007	2.056.486	592.552	29	2.060.000
Yunanistan	2006	125.977	56	<1	290.000
İrlanda	2003	42.449	26.743	63	135.000
İtalya	2006	1.070.080	189.554	18	1.500.000
Lüksemburg	2003	8.200	3.300	43	15.000
Hollanda	2003	550.000	34	<1	560.000
Portekiz	2002	412.517	189.758	46	420.000
İspanya	2006	1.064.972	687.037	65	1.280.000
İsveç	2006	214.286	30.000	14	250.000
İngiltere	2006	1.544.891	1.050.526	68	1.640.000
EU15		8.874.862	3.701.406	42	10.491.000
Bulgaristan	2006	29.640	11.856	40	180.000
Kıbrıs	2006	7.600	3.116	41	17.000
Çek Cumhuriyeti	2007	230.704	59.983	26	260.000
Estonya	2005	26.800	3.316	vy	33.000
Macaristan	2006	128.380	32.813	26	250.000
Letonya	2006	24.151	8.936	37	50.000
Litvanya	2007	77.238	24.716	32	80.000
Malta	-	vy	vy	vy	10.000
Polonya	2006	523.674	88.501	17	950.000
Romanya	2006	137.145	0	0	520.000
Slovakya	2006	54.780	0	0	135.000
Slovenya	2007	21.139	18	0	50.0000
EU12		1.260.883	233.255	19	2.485.000
EU27		10.135.745	3.934.661	39	12.977.000

tKM: ton kuru madde; vy: veri yok

Almanya çamur üretiminde ilk sırada olup, İngiltere, Fransa, İtalya ve İspanya bu sırayı takip etmektedir. Bu 5 ülke Avrupa'da çıkan arıtma çamurunun yaklaşık %70'ini üretmektedir. Diğer ülkeler ise geriye kalan %30'luk dilimi oluşturmaktadır. Bu durum kabaca ülkelerin demografik yapısını da yansıtmaktadır.

Yapılan araştırmalara göre Fransa, İngiltere, Almanya, Hollanda'da yakma yoluyla bertarafın artacağı tahmin edilmektedir. İrlanda, Finlandiya, İngiltere ve Portekiz de ise arıtma çamurunun arazide kullanımının artacağı öngörülmektedir.

Genel olarak 2005 yılı itibarıyla Avrupa Birliği ülkelerinde üretilen çamurun %19'u düzenli depolama, %23 'ü yakma yoluyla bertaraf edilirken, %55'inin arazide kullanım yoluyla bertaraf edileceği öngörülmüştür. Avrupa Birliği ülkelerinde kullanılan çamur uzaklaştırma yöntemleri Şekil 3.2 de verilmiştir.



Şekil 3.2 AB ülkelerinde 1996-1998 arası kullanılan çamur bertaraf sistemleri (EC, 2001).

3.4 Türkiye’de Arıtma Çamurlarının Durumu

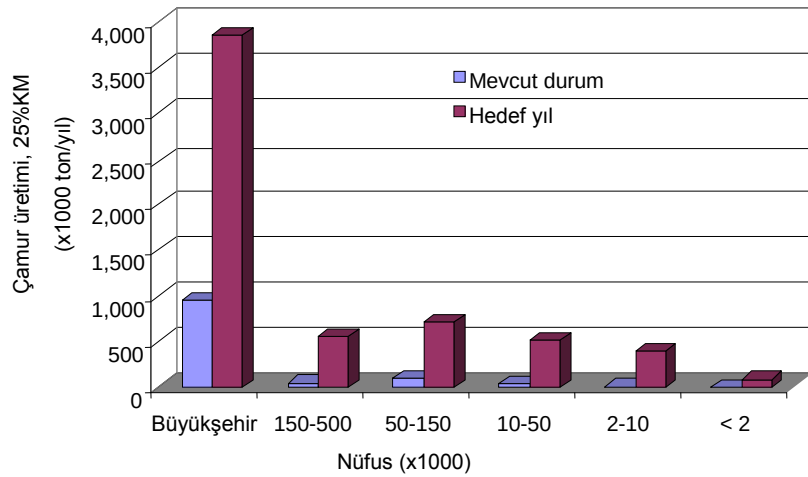
Artan nüfus ve gelişmişlik düzeyine bağlı olarak her geçen gün su ihtiyacı artmakta ve bununla orantılı olarak atıksu miktarı artmaktadır. Ülkemizde atıksuların kanalizasyon yoluyla toplanması ve arıtılması faaliyetleri hızla büyümektedir.

Atıksuların arıtılma durumu arttıkça doğal olarak oluşan arıtma çamuru miktarı da artmaktadır. Evsel ya da kentsel atıksu arıtma tesisi olarak tanımlanan tesislerde oluşan arıtma çamuru miktarı, uygulanan prosese, kirlilik konsantrasyonlarına ve uygulanan çamur susuzlaştırma yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Literatürde birim arıtma çamuru oluşum miktarı ile ilgili farklı değerler verilmekte olup, kişi başına arıtma çamuru oluşumu 26-90 gr kişi/gün-kuru madde olarak ifade edilmektedir (Akça, 2005).

Arıtma çamurlarının katı madde içeriği, çamur kurutma yataklarında %80-90 oranına kadar yükselirken, mekanik çamur susuzlaştırma uygulanan tesislerde bu değer % 17-25 düzeyinde kalmaktadır. Elde edilen çamur miktarı ise genellikle 1 ton arıtma çamuru /1000 m³ atıksu mertebesindedir. Bu yaklaşım kullanılarak, ülkemizde yılda 1,38 milyon ton evsel arıtma

çamuru oluştuğunu ifade etmek mümkün görülmektedir. Çevre Bakanlığı adına uluslar arası bir konsorsiyum tarafından yürütülen “Yüksek maliyetli çevre yatırımlarının planlanması” projesinde tahmin edilen çamur miktarları Şekil 3.3 te verilmiştir (Çakmakçı, 2005).

Oluşan arıtma çamurlarının miktarı ve bertaraf yöntemi konusunda Devlet İstatistik Enstitüsü (DİE) tarafından yapılmış istatistiksel bir çalışma bulunmamaktadır. DİE verileri göz önünde tutulduğunda ülkemizde oluşan yıllık evsel arıtma çamuru miktarının 1,38 milyon ton/yıl olduğu tahmin edilebilir. Oluşan arıtma çamurlarının tarım arazilerinde kullanımına yönelik çeşitli çalışmalar yapılsa da bu konu ile ilgili belirgin gelişmeler sağlanamamıştır. Oluşan arıtma çamurlarının büyük bir kısmı katı atık depolama sahalarında ya da arazide depolanmak sureti ile bertaraf edilmektedir.



Şekil 3.3 Türkiye’de çamur miktarlarının mevcut durumda (2002) ve gelecekte (2022) yerleşim yerleri büyüklüğüne göre değişimi.

Ülkemizde 1980’li yılların ikinci yarısından itibaren İller Bankası tarafından yapımı gerçekleştirilen ve büyük bir bölümü 10.000–50.000m³/gün kapasiteli olan atık su arıtma tesislerinde arıtma çamurları genellikle çamur kurutma yataklarında %80-90 oranında kuru madde içerecek şekilde kurutulduktan sonra, yöre çiftçileri tarafından gübre olarak kullanılmaktadır. Ege bölgesindeki Manisa, Akhisar, ve Alaşehir atık su arıtma tesisleri bu duruma örnek olarak gösterilebilmektedir (Akça, 2005).

Türkiye’de endüstriyel gelişmenin yetersizliği ve son yıllarda endüstriyel tesislerin önemli bir bölümünün kendilerine ait atık su altyapısı bulunan organize sanayi bölgelerinde kurulması, kentsel atık su içerisindeki endüstriyel atık su miktarlarının düşük kalmasına yol açmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da ülkemizdeki kentsel atık su arıtma tesisi çamurlarındaki ağır metal konsantrasyonları düşük kalmaktadır.

Ülkemizde sanayi sektöründe 6,8 milyar m³/yıl su tüketimine bağlı olarak 1 milyon ton/yıl arıtma çamuru oluştuğu tahmin edilmektedir (Akça, 2005). Prosese ve kullanılan girdilere bağlı olarak sanayi sektöründe oluşan arıtma çamuru içeriği çok değişmekle birlikte özellikle metal, kimya ve elektronik sanayinde oluşan çamurların yüksek ağır metal ve toksik madde içerikleri ile tehlikeli atık sınıfında değerlendirilmeleri muhtemel görünmektedir.

3.5 İstanbul'da Arıtma Çamurlarının Yönetimi

İstanbul 13 milyonu aşan nüfusu ve günlük 2.000.000 m³ ü aşan su tüketimi ile büyük bir metropoliten yerleşim alanıdır. 22 Temmuz 2004 tarihinde çıkan 5216 sayılı yasa ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin görev ve yetki alanı il sınırlarına kadar genişletilmiştir. İstanbul'da arıtma tesislerinin sayısı sürekli olarak artmakla birlikte, çamur yönetimine yönelik entegre planların hazırlanmasına yeni başlanmıştır. 2000 yılında hazırlanan ***“İstanbul Su Temini, Kanalizasyon, Atıksu Arıtımı ve Yağmur Suyu Drenajı Master Planı”*** nda (Master Plan (2000) çamur yönetimi ile ilgili bir bölüm bulunmakla birlikte bu bölüm İstanbul'un çamur yönetimine tam bir çözüm getirmemektedir. İstanbul'dan kaynaklanan/kaynaklanacak olan evsel ve endüstriyel arıtma çamurlarının miktarlar ve özelliklerinin, atıksu özelliklerine ve seçilen arıtma sistemine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişeceği açıktır. Evsel atıksu özellikleri ise özellikle ön arıtmadan geçmiş endüstriyel atıksu miktar ve özelliklerine bağlı bazı değişimler gösterebilecektir. Dolayısıyla sağlıklı bir çamur yönetim planı hazırlanabilmesi için öncelikle;

- Atıksu yönetim planının belirlenmesi,
- Bu plana göre ortaya çıkacak çamur miktar ve özelliklerinin tespit edilmesi,
- Elde edilen veriler kullanılarak çamur uzaklaştırma alternatiflerinin teknik, ekonomik, yasal ve çevresel etkiler dikkate alınarak değerlendirilmesi,
- Çıkan sonuca göre gerekirse atıksu yönetim planının yeniden gözden geçirilmesi

gerekmektedir. Dolayısıyla atıksu yönetim planı ile çamur yönetim planının birbirinden bağımsız olarak değil, birlikte hazırlanması ve karşılıklı etkileşimlerin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müdürlüğü için evsel ve endüstriyel çamur yönetimi için yapılan ilk çalışma 1993 yılında hazırlanmıştır. Bu konudaki ikinci çalışma ise İstanbul Su Temini, Kanalizasyon ve Yağmur Suyu Drenajı, Atıksu Arıtımı ve Uzaklaştırılması Master Planı (2000) kapsamında yapılmıştır. Her iki planda da çamur yönetim planının başarısı için endüstriyel ön arıtma programı olmadan atıksu arıtma

tesislerinin işleyişinde çok büyük problemler ile karşılaşılabilceği, bunun da çamur yönetimini etkileyeceği belirtilmiştir. Diğer taraftan İstanbul Metropolü içerisinde atıksu çamurlarının faydalı kullanımı için bir seçenek bulamadığı belirtilmiş ve yakma tesislerinin, ilgili oldukları arıtma tesisinin planlanan inşaat etaplarına uyacak şekilde bölümler halinde inşa edilmeleri tavsiye edilmiştir.

Master Plan (2000)'de kısa (2010) ve uzun (2040) dönem atıksu arıtma stratejilerine bağlı olarak hesaplanan kuru çamur miktarları Çizelge 3.5 te özetlenmiştir.

Çizelge 3.5 Master Plan (2000)'e göre atıksu arıtma stratejileri ve kuru çamur miktarları (Akça, 2005).

Tesis	Kısa dönem stratejisi (2010)		Uzun dönem stratejisi (2040)	
	Ortalama kapasite m ³ /gün	Kuru çamur miktarı kg/gün	Ortalama kapasite m ³ /gün	Kuru çamur miktarı kg/gün
Avrupa Yakası				
Büyükçekmece	95.040	30.800	334.022	117.300
Küçükçekmece	621.994	232.100	1.017.014	355.300
Yenikapı	545.962	24.000	832.982	161.500
Baltalimanı	289.958	13.100	442.973	88.800
Terkos	2.074	700	3.024	1.100
Kilyos	-	-	1.296	300
Batı Marmara	-	-	59.270	17.800
Toplam	1.555.028	300.700	2.690.581	742.100
Asya Yakası				
Tuzla	487.037	186.000	912.038	322.200
Paşaköy	296.006	79.300	322.013	101.900
Küçüksu	166.579	7.100	-	-
Kadıköy+Göksu	432.432	18.400	-	-
Paşabahçe	23.414	1.000	-	-
Üsküdar	72.662	3.100	-	-
Riva	-	-	1.031.011	204.300
Büyükada	948	2.800	11.232	3.600
Kınalıada	5.443	1.700	6.394	2.200
Burgazada	3.024	1.000	3.542	1.200
Heybeliada	9.072	2.800	10.886	3.500
Tepeören	-	-	77.328	24.900
Toplam	1.505.088	303.200	2.374.445	663.800

Master Plan (2000)'deki değerlendirmelere göre, 2020 yılına kadar tahmini düzenli katı atık depolama sahası ihtiyaçları Avrupa Yakası için 77 milyon m³ (yaklaşık 171 ha) ve Asya Yakası için 44 milyon m³ (yaklaşık 98 ha)dır. 2020 yılı için İstanbul genelinde kişi başına düşen yıllık katı atık depolama hacim ihtiyacı yaklaşık 0.39m³tr. % 30 katı madde oranına sahip arıtılmış çamurların, tamamının evsel katı atıklarla birlikte depolanması durumunda, kişi başına düşen evsel atıksu çamuru depolama ihtiyacı ise yaklaşık 0.11m³ olarak tahmin edilmiştir.

Çamurun tarım alanlarına uzaklaştırılarak bertaraf edilmesi alternatifi için gerekli alan ihtiyacı 2020 yılı için 63.000ha olarak hesaplanmıştır. İstanbul Metropolitan Alanı'nda řu anda tarım için kullanılan arazi 2020 yılı ihtiyacının yaklaşık iki katıdır. Ancak bu alanın halihazırda büyük bir kısmı insanlar tarafından doğrudan tüketilen yiyeceklerin üretiminde kullanılmakta olduğundan uygun değildir. Ayrıca tarım arazileri, İstanbul'un artan nüfusunun konut ihtiyacını karşılamak amacıyla da kullanılmaktadır. Bu nedenlerin yanında, tarımsal arazi sahiplerini, arazilerinin çamur uzaklaştırılması için kullanılmasına ikna etmenin zorlukları da göz önüne alındığında, çamurun tarım arazilerine uzaklaştırılması uygun bir çözüm olarak görülmemektedir.

Çamurun tahsis edilmiş alanlara dökülmesi veya tek tip dolgu halinde uzaklaştırılması alternatifleri için gerekli alan ihtiyacı 2020 yılında susuzlaştırılmış çamur için 2.083ha, yanma sonrası küller için 1.378ha. dır (Akça, 2005).

İstanbul'da ve Türkiye'de çamur ürünleri için herhangi bir pazar bulunmamaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Park ve Bahçeler Müdürlüğü'nün gübre ihtiyacı, dağıtım ve pazarlama seçeneklerinin hiçbirini gerçekleştirmek için yeterli değildir.

Atıksu arıtmadan çıkan artık çamurun katı atıklarla birlikte uzaklaştırılması alternatifi, ilgili yönetmelikte göz önünde tutularak uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Katı atıklarla birlikte uzaklaştırma alternatifi, çamurun yakılması durumunda küller için de geçerlidir. Master Plan (2000)'de İstanbul arıtma amurlarının uzaklaştırılması için uygulanabilir alternatifler olarak

- Susuzlaştırılmış amurun katı atıklarla birlikte uzaklaştırılması
- Yakma ve sonrasında küllerin katı atıklarla birlikte uzaklaştırılması

seçenekleri önerilmiştir.

4. ARITMA ÇAMURLARININ KOMPOSTLAŞTIRILMASI

4.1 Kompostlaştırma Prosesi

Kompostlaştırma, organik atıkların (evsel katı atıkların organik kısmı, biyolojik arıtma çamurları vb.) biyokimyasal süreçlerle parçalanarak zirai gübre değeri yüksek bir son ürüne (kompost) dönüştürülmesi olarak tanımlanabilen ve günümüzde yaygın şekilde kullanılan bir teknolojidir. Kompostlaştırma prosesi aerobik veya anaerobik koşullarda gerçekleştirilebilir.

Aerobik kompostlaştırma, organik maddelerin oksijenin (havanın) mevcut olduğu ortamlarda ayrıştırılması işlemidir ve oluşan başlıca metabolik ürünler karbondioksit, su ve ısıdır.

Anaerobik kompostlaştırma, organik maddelerin oksijenin (havanın) bulunmadığı ortamlarda ayrıştırılması işlemidir ve oluşan başlıca metabolik ürünler metan, karbondioksit ve organik asitler gibi düşük molekül ağırlıklı bileşikler olarak sayılabilir. Anaerobik kompostlaştırmada ayrıştırılan organik madde başına daha az enerji açığa çıkması, prosesin tamamlanması için gereken sürenin çok uzun olması, oluşan ara ürünler ve ürünler sebebiyle koku probleminin ortaya çıkması, sıcaklığın istenen değerlere yükselememesi gibi nedenlerden dolayı kompostlaştırma sistemlerinin çoğu aerobik olarak işletilmektedir (Öztürk vd., 2004).

Arıtma çamurlarının kompostlaştırılması, çamurların biyolojik olarak stabilize edilerek kirletici risklerinin kontrol altına alınmasını ve böylelikle ziraat veya sahip oldukları besleyici maddeler ve organik değer nedeni ile son ürün olarak değerlendirilmelerini amaçlar. Kompostlaştırmayla, çamurun su miktarında potansiyel bir azalma da gerçekleşir. Verim ise, uygulanan kompostlaştırma prosesine bağlıdır.

Kompostlaştırma prosesi kendi içinde üç fazdan oluşur.

- Hızlı bozuşma
- Stabilizasyon
- Olgunlaşma

Hızlı bozuşma safhası kompost prosesinin termofilik kısmıdır ve buradaki sıcaklık 50-70 °C arasında değişmektedir. Bu safhada hızlı parçalanma sebebiyle hacim ve kütlerde azalma meydana gelir. Bu fazda yüksek sıcaklıktan ötürü patojenler ölür. Bu fazdaki henüz olgunlaşmamış kompost “*taze kompost*” olarak adlandırılır.

Stabilizasyon süresince ise taze kompost bozularak “*aktif kompost*” denilen forma dönüşür. Burada sıcaklık düşer, parçalanma devam eder ve organik madde daha stabil bir hale gelir.

Olgunlaşma safhasında ise kompost olgunlaşarak “*nihai kompost*” olarak nitelendirilir. Bu

fazda kompostun sıcaklığı çevre sıcaklığı değerine gelir ve olgunlaşmasını tamamlar. Genel olarak kompostlaştırma süreci aşağıdaki adımlardan oluşur;

Ön Proses:

- Toplama ve Ayırma
- Parçalama ve boyutlandırma
- Yığın malzemesi karıştırma ve su ilavesi
- Yığına şekil verme
- Pasif ya da aktif havalandırma
- Aktarma ve karıştırma
- Su İlave Etme

Son Proses:

- Eleme
- İyileştirme
- Ürünün karıştırılması
- Depolama

Biyokatıların kompostlaştırılmasında, ilk adım olarak arıtma çamuru fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri bakımından uygun ilave metaryallerle karıştırılarak porozitenin artırılıp havalandırmanın etkin şekilde yapılması sağlanır. Bunun için genellikle yonga, çalı parçaları, saman, kağıt metaryaller vb. malzemeler kullanılır. Arıtma çamuruna ilave edilecek ilave malzemeler öncelikle parçalanmalıdır. Tipik olarak parçacıkların ebatları havalandırmalı yığınlarda 12,5-50mm arası, diğer kompost sistemlerinde ise 6-12mm arası olması gerekir (WEF, 1995b). Bu safhada geniş ölçekli işletmeler için iş makinası(loder) kullanılarak karıştırma yapılması yeterli değildir. Bu sebeple büyük sistemlerde, sürekli karıştırma makinelerinin ya da düzeneklerin bulunması gerekir.

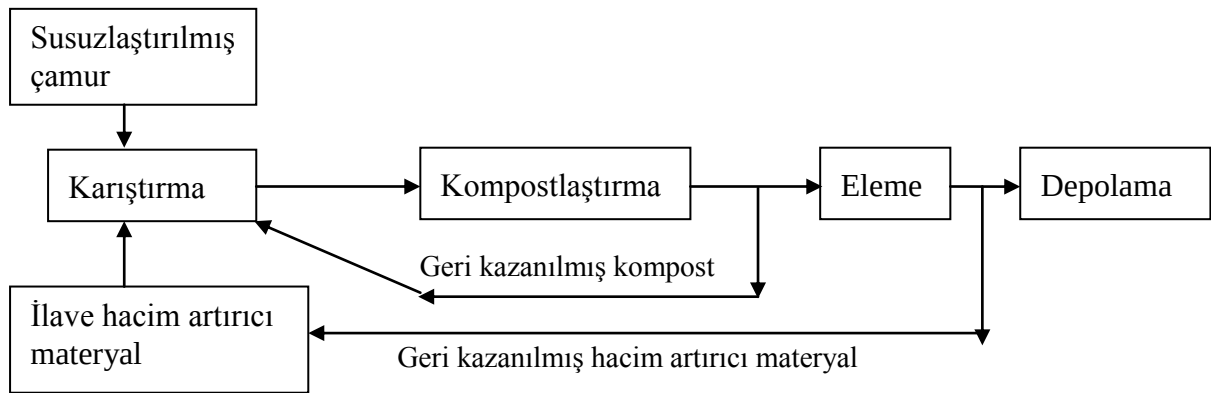
Hızlı parçalanma aktivitesi ve daha fazla koku oluşu nedeniyle, hızlı bozuşma ve stabilizasyon safhaları olgunlaşma safhasına göre daha fazla proses kontrolü gerektirir. Bu yüzden pek çok uygulamada hızlı bozuşma ve stabilizasyon safhasının bir kısmı reaktör içerisinde kapalı alanda, geriye kalan stabilizasyon kısmı ve olgunlaşma safhası ise reaktör dışında yer alır.

Kompostlaştırma esnasında susuzlaştırılmış çamur bir yada daha fazla ilave materyalle (ağaç kabuğu, yonga vb.)hem nem muhtevasının kontrolü hem de sistemin C/N oranı ve enerji dengesi sağlamak için karıştırılır. Kompostlaştırma prosesi tamamlandıktan sonra ürün

istenilen aralıklarda elenerek başlangıçta karıştırılan ilave metaryaller tekrar kullanım için geri kazanılabilir. Yonga gibi odun parçacıkları %65-85 oranında geri kazanılır.

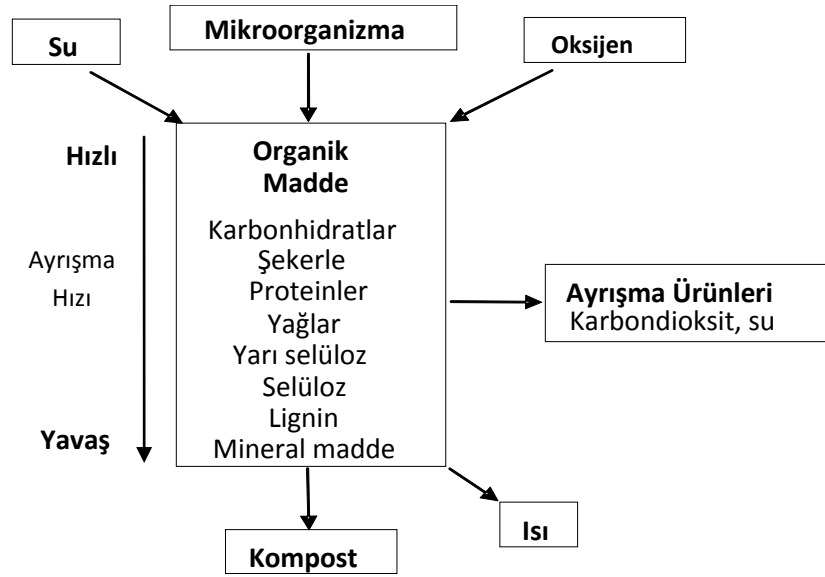
Organik maddeler, fosfor ve azot gibi besleyici maddeler çiftçiler tarafından talep gördüklerinden, zengin organik besleyici özelliğe sahip kompost değerli bir toprak iyileştiricisi olarak işlev görmektedir. Zirai amaçlı nihai kullanım gayesi ile kompostlaştırılan arıtma çamurları ikincil pazarlar için önemli bir değer teşkil eder. Arıtma çamurlarının yakılmaları halinde, kompostlaştırma prosesi, çamurun içindeki suyu azaltan ve böylelikle de yanma verimini arttıran bir ön-işlem olmaktadır. Bununla birlikte, arıtma çamurunun önce kompost yapılması ve daha sonra da yakılması yüksek işletme maliyeti doğurmaktadır. Ayrıca, bu durumda organik madde bozulmuş olacağından, çamurun kurutulması için gerekli olan kalorifik değer de sınırlanmış olmaktadır.

Kompostlaştırma prosesiyle bütün biyolojik çamur tipleri işlenebilir. Ancak bununla beraber ham çamurların kompostlaştırılması esnasında işlenmiş çamura nazaran daha fazla koku oluşur ve %40 kadar daha fazla alana ihtiyaç duyulur. Diğer taraftan ham çamur daha hızlı ısınır ve daha iyi kurur. Şekil 4.1’de susuzlaştırılmış çamurun kompostlaştırma akım şeması görülmektedir.



Şekil 4.1 Çamur kompostlaştırma prosesi akım şeması.

Kompostlaştırma esnasında mikroorganizmalar çamurun organik kısmını ve kısmen de ilave metaryalleri parçalarlar. Aerobik parçalanmanın son ürünü çoğunlukla su, CO₂, biyokütle(mikroorganizmalar) ve stabil komposttur. Parçalanma süresince açığa çıkan enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür ve bunun sonucunda kompostun sıcaklığı 70-80°C'lere kadar çıkar. Bu sıcaklığın artışı patojenlerin azalımı için gereklidir (Öztürk vd., 2005). Kompostlaştırma mekanizması girdi ve çıktıları genel olarak Şekil 4.2 de görülmektedir.



Şekil 4.2 Kompostlaştırma mekanizması girdi ve çıktıları (Epstein, 1997).

Kompostlaştırma prosesi boyunca çamurun organik kısmının parçalanmasından %80-90 oranında bakteriler sorumludur. Biyolojik parçalanmada görev alan diğer mikroorganizmalar ise mantarlar ve aktinomisetlerdir. Bunlar daha sonra gelen kuruma ve iyi havalandırma şartlarının sağlanmasında lignin gibi biyolojik olarak parçalanması zor maddelerin bozulmasında tercih edilirler. Bakteriler 75°C de hayatta kalırken, aktinomisetler için sıcaklık limiti yaklaşık 65 °C, mantarlar için ise 60 °C dir. Genellikle beslenmiş yığın yeterli mikroorganizma popülasyonuna sahip olduğundan ilave bir aşlamaya gerek kalmaz (İSTAÇ, 2010)

Kompostlaştırma prosesine girecek olan arıtma çamuru inorganik ve biyolojik olarak parçalanabilen organik kısımdan oluşur. Biyolojik olarak parçalanabilen organik kısım; lignin, hemiselüloz, selüloz, şeker, nişasta, yağlar, parafin ve proteinlerdir. Organik sınıf içerisinde yer alan bileşiklerin mikrobiyal parçalanmaya karşı gösterdiği dayanım sırasıyla şeker, nişasta, protein, yağ, selüloz, hemiselüloz, lignin ve diğer moleküler bileşiklerdir (Poincelot, 1975). Arıtma çamuru içine konan ağaç parçacıkları arıtma çamurundan daha fazla oranda zor parçalanan bileşikleri yapısında ihtiva eder.

Organik bileşiklerin kompozisyonu ve parçalanma oranları kompost süresince enerji dengesini etkileyen temel faktörlerdir. Ham çamurun parçalanabilme oranı %70-80 arasındadır. Çürütülmüş çamur içinse bu oran %35-55 mertebelerindedir (Haug, 1993).

Aerobik kompostlaştırma, her bir mikrobiyal grup için ortamın sınırlı sürelerde uygun olduğu, ardarda gerçekleşen dinamik biyolojik bir prosestir. Aerobik kompostlaştırma prosesinde görev alan başlıca organizmalar Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kompostlaştırma prosesinde görev alan mikroorganizmalar (Biddlestone vd. , 1987).

Mikroflora (çok küçük bitkiler)	Bakteriler	Çok küçük ve fazla sayıdadırlar. Bazıları spor yapar. Büyüklükleri 1-8 µm arasındadır.
	Aktinomisetler	İnce dallı filamentlere sahiptirler. Kuru ve sıcak koşullarda gelişirler. Filamentleri 0.5-2 µm çapındadır.
	Mantarlar, maya mantarları	Büyük organizmalardır. Genellikle filament ve spor oluştururlar. Birçok türü vardır. Termofilik olanları çok önemlidir. Büyüklükleri 3-50 µm arasındadır.
	Algler	Nemli koşulları severler. Büyüklükleri 10-100 µm arasındadır.
	Virüsler	Çok küçüktürler. Bakteri veya aktinomiset gibi konak organizmaya ihtiyaç duyarlar. Büyüklükleri; baş kısmı 0-1 µm çapında, kuyruğu 0.2 µm uzunluğundadır.
Mikrofauna (çok küçük hayvanlar)	Protozoa	Tüy ve kamçıları ile hareket ederler. Bazıları bakteri ile beslenirler. Büyüklükleri 5-80 µm aralığındadır.
Makroflora (büyük bitkiler)	Makro-mantarlar	Yüksek mantarlar da denir. Kompost yığının üst kısmında büyürler. Baş kısımları yaklaşık 20 mm çapındadır.
Makrofauna (küçük toprak hayvanları)	Çok ayaklılar	Otobur olanları 20-40 mm uzunluğunda, etobur olanları 30 mm uzunluğundadır.
	Kurtlar	Bir kısmı etobur, bir kısmı otoburdur. Büyüklükleri 0.1-2 mm arasında değişir.
	Solucanlar, karıncalar, termitler, örümcekler	İnek gübresi yığınlarında <i>Eisenia foetida</i> , ya da inek gübresi kurdu olarak isimlendirilir.

Aerobik kompostlaştırma prosesinde aktif olan başlıca mikroorganizmalar, çok çeşitli türde bakteriler, mantarlar ve aktinomisetlerdir. Ayrıca, maya mantarları ve protozoalar da görülebilir. Bu mikroorganizmaların hepsi, farklı zamanlarda aktif olup oksijen ve sıcaklığa bağlı olarak fizyolojik koşulların değişimini gösterirler. Oksijen gereksinimleri ile ilgili olarak mikroorganizmalar, mutlak havalı (aerobik) ve fakültatif mikroorganizmalar olarak karakterize edilebilirler. 10-40°C sıcaklık aralığında çalışan mikroorganizmalar mezofilik, 40-70°C sıcaklık aralığında çalışanlar ise termofilik mikroorganizmalar olarak adlandırılır.

Bakteriler, hem havalı hem de havasız ortamlarda hızlı büyüme yeteneğine sahip, tek hücreli mikroskopik organizmalardır. Bakteriler, %80 su ve %20 kuru madde (%90'ı organik, %10'u inorganik) içerirler. Organik kısım, hücrenin farklı kısımlarında bulunan protein, karbonhidrat ve yağları içerir. İnorganik kısım ise, fosfor, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, demir ve eser elementlerden oluşur.

Mantarlar, düşük nem ve geniş bir pH aralığında çeşitli organik maddeleri ayrıştırabilen, filamentli, spor oluşturan, fotosentetik olmayan, heterotrofik mikroorganizmalardır.

Aktinomisetler, hem bakterilere hem de mantarlara benzer özellikler gösteren mikroorganizma grubudur. Şekil olarak mantarlara benzerler, fakat daha az filamentlidirler. Aktinomisetler, orta derecede kuru maddelerin kompostlaştırılmasında belirgin bir role sahiptir.

Maya mantarları, tek hücreli bitkisel gelişmeye uyum sağlamış mantar gelişiminin bir safhasıdır. Maya mantarları, genellikle substrat olarak çözünmüş karbonhidrat ve şekerleri tercih ederler. Diğer mikroorganizmaların üzerinden beslenen kontrolsüz, tek hücreli mikroorganizma grubu olan protozoalar da kompostlaştırma prosesinde bulunabilirler.

Mantarlar, maya mantarları ve aktinomisetler, selüloz ve hemiselülozun, bakteriler ise suda çözünen şekerlerin ayrıştırılmasında etkilidir. Metabolik gereksinimlerinin yanında, kompostlaştırma prosesi esnasında mikroorganizmaların üstünlükleri de değişir. Kompostlaştırma prosesinin başlangıç safhasında mezofilik bakteriler hakimdir. Kompostun sıcaklığının yükselmesi ile termofilik bakteriler, daha sonra 7-10 gün sonunda mantarlar baskın hale gelir. Son safhada, aktinomisetler ve solucanlar ortaya çıkar. Bakterilere kompost yığının her yerinde rastlanırken, mantar ve aktinomisetler, kompost kümesi yüzeyinin hemen altında, dış tabakanın 5-12 cm'lik kısmında yer alırlar. Bazı biyolojik olarak ayrışabilir maddelerde, bu mikroorganizmalar yeterli miktarlarda bulunmadığından, aşı olarak kompost ilave etmek gerekebilir.

4.2 Kompostlaştırmanın Avantaj ve Dezavantajları;

Kompostlaştırma sisteminin en büyük avantajı hemen ya da depolandıktan sonra toprağa uygulanabilir olmasıdır. Kompostlaştırma sisteminin maliyetleri sistem seçimine bağlı olarak artabilir ya da azalabilir. Arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasındaki en önemli dezavantaj ise, ilave metaryallerden gelen olası bir hacim artışı ve hava emisyonları oluşturmalarıdır. Bir diğer önemli risk ise arıtma çamurlarının içindeki ağır metaller ve organik mikrokirleticiler kompostlaştırma prosesi için toksik özellik taşıdıkları gibi elde edilen kompostunda uygulama alanını sınırlar (R&R, 2005). Arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında diğer bir dezavantaj ise büyük ölçekli işletmelerde uygulama için geniş alana ihtiyaç vardır. Arıtma çamurlarının kompostlaştırma prosesinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 4.2 de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 Kompostlaştırma prosesinin avantaj ve dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
Tarım arazilerine serilmek üzere taşınacak malzemelerin hacimlerinde azalma olur.	Kompostlaştırma prosesinde %18-30 arası susuzlaştırılmış çamura ihtiyaç duyulması
Nihai ürünün depolanabilir olması	Gözenekliliğin artması için ilave metaryallere ihtiyaç duyulması
Nihai ürünün potansiyel olarak satılma olanağının olması	Fazla yer gereksinimi
Kompostlaştırma prosesinin diğer sistemlerle kombine edilir olması	İşleme maliyeti arıtma çamurunun ham olarak serilmesine göre daha fazladır
Yakmaya göre daha düşük maliyet gereksinimi	Havalandırma enerji sarfiyatına neden olur
Zirai uygulamadan önce ürünün hijyenliği sağlanır	Potansiyel koku ve biyoaerosol oluşumu
Ürünün daha az su ihtiva etmesi nedeni ile araziye serilmesi daha kolay olur	Kompostun nihai ürün olarak kullanılması için bir ihtiyacın olması gerekir
Optimum C/N oranını temin etmek için arıtma çamurunun, diğer atıklarla (işlem görmesi gereken diğer atıkların mevcut olması halinde) karıştırılması avantaj olabildiği gibi, bu atıkların satın alınmasının zorunlu olması halinde bir dezavantaja dönüşebilir	

Kompostlaştırma prosesi sonucu elde edilen kompost ürünü stabildir. Bu sebeple kompost genelde toprak şartlandırıcı olarak tarım alanlarında, park ve bahçelerde, kirlenmiş toprakların ıslahında kullanılabilmektedir. Kompost bitkilerin büyümesi için gerekli olan makro element ve mikro elementleri yapısında ihtiva eder. Bununla beraber bir toprak şartlandırıcı olarak kullanılan kompostun temel etkisi toprağa nütrient ilavesinden ziyade toprağın humus dengesini sağlayıcı bir rol oynamasıdır (De Bertoldi et al., 1983).

Kompost toprağın su tutma kapasitesini geliştirirken, diğer taraftan da erozyon kontrolüne, sıcaklığın düzenlenmesine ve pH dengesinde tampon olmak gibi artı özelliklere sahiptir. Kompost aynı zamanda ağır metalleri de içerir. Düşük konsantrasyonlarda bakır ve çinko gibi bazı metaller temel nütrientlerdir. Bunun yanı sıra ağır metal bakımından yüksek konsantrasyona sahip kompostun toprağa uygulanması oldukça sakıncalıdır. Yapısında yüksek miktarda ağır metal, patojen ve sentetik organik gibi istenmeyen kirleticiler bulunan biyokatıların toprağa uygulanmaması için pek çok yasa ve yönetmelikler çıkartılmıştır. Genellikle Avrupa Birliği Ülkeleri, Amerika'dan daha katı kanun ve standartlara sahiptir

4.3 Kompostlaştırmaya Etki Eden Parametreler

Kompostlaştırma prosesinin geliştirilmesi ve kompostlaştırma süresince mikrobiyal bozunma sonucu oluşan koku gibi çevreye olan olumsuz etkinin minimize edilmesi bu sistemlerin etkin

bir şekilde kontrol edilmesiyle mümkün olabilir. Arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında su muhtevası, sıcaklık, havalandırma, C/N oranı, pH, dane boyutu, hacim artırıcı malzemeler, karıştırma, kullanılan malzemelerin yapısı gibi pek çok parametre işletme koşullarında göz önünde bulundurulur. Kompostlaştırma işletme şartlarını etkileyen temel parametreler aşağıda açıklanmıştır.

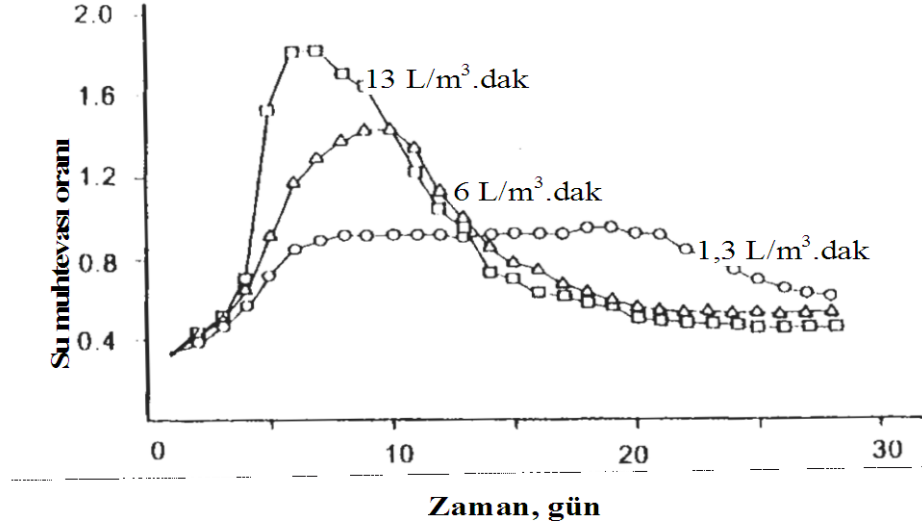
4.3.1 Su Muhtevası

Su muhtevası, kompostlaştırma prosesinde mikrobiyal aktiviteyi etkiler. Mikrobiyal aktivite ise, sıcaklığı ve organik maddenin ayrışma hızını etkilemektedir. Su, mikrobiyal aktivite ve organik maddenin biyolojik oksidasyonu sonucu üretilir. Üretilen su, buharlaştırma ile kaybolur. Fakat laboratuvar ölçekli kompostlaştırma çalışmalarında, mikrobiyal aktivite sonucu açığa çıkan su buharlaşmadan daha fazla olabilmektedir. Mikroorganizmalar, çoğalmaları için gerekli besinleri suda çözünmüş olarak özümleyebilirler. Ayrıca, mikroorganizmaların yapılarının %80'i sudur. Bu nedenlerle, kompostlaştırma prosesi için belirli miktarda su bulunması şarttır, fakat suyun fazlası daneler arasındaki boşlukları doldurarak, havalandırmayı engellemekte ve özellikle ortamı havasız (anaerobik) hale dönüştürerek, kokuya ve patojen mikroorganizmaların canlı kalmasına sebep olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, kompostlaştırma prosesi için teorik su ihtiyacı %100 olduğuna göre hava girişinin engellenmemesi için bu oran yarı değerinde tutulmaktadır (Öztürk, 2010).

Kompost oluşumunda az miktarda su üretilirken, artan nem muhtevası dolayısıyla organik madde bozuşmaya uğrar. Kompostlaştırma boyunca artan sıcaklık nem muhtevasındaki buharlaşmadan dolayı azalır. Buharlaşma, kompostlaştırmadaki temel enerji kaybıdır. Kompostlaştırma esnasında nem muhtevasındaki değişiklik özellikle kompostun sıcaklığına ve havalandırma oranına bağlıdır.

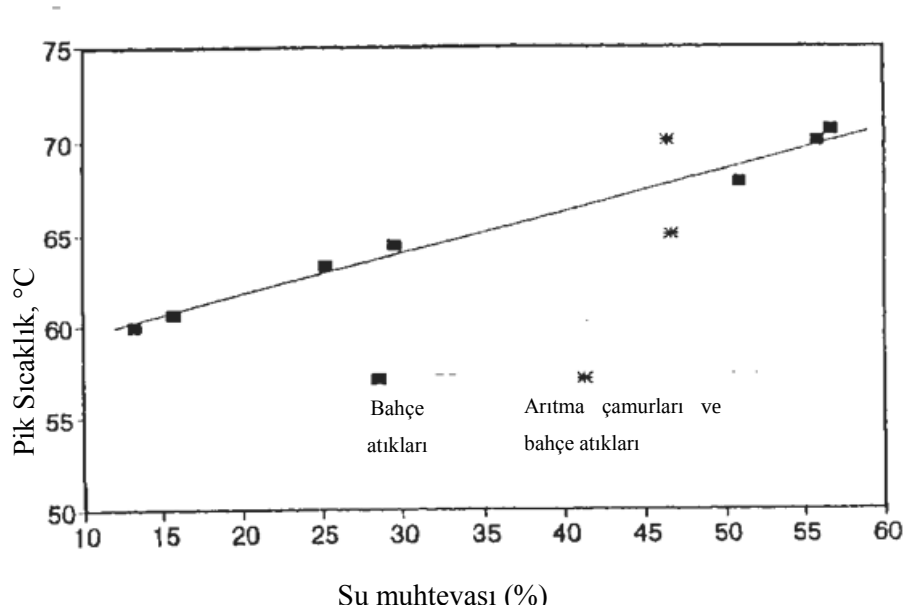
Mikrobiyal parçalanma için gerekli minimum nem oranı %12-15 arasındadır. Arıtma çamurlarının optimum nem muhtevası hammaddenin kalınlığına ve kullanılan kompost teknolojisine bağlıdır. Arıtma çamurları için ilk nem muhtevası %55-60 olarak tavsiye edilir. Aktarmalı sistemlerde, aktarma sıklığı buharlaşma ve yeterli poroziteyi arttırdığından, nem muhtevası %60-65'lerde yönetilebilir (WEF, 1995a).

Arıtma çamurları ve ağaç yongaları ile yapılan pilot çalışmada (Coppola v.d., 1983), açığa çıkan suyun havalandırmanın bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur (Şekil 4.3). En büyük su kaybı, 13 L/m³.dak'lık havalandırma hızında elde edilmiştir. Su muhtevası 7. ve 15. günler arasında düşmüş ve sonrasında yaklaşık % 40'ta sabit kalmıştır.



Şekil 4.3 Arıtma çamuru ve ağaç yongası karışımının kompostlaştırılması sırasında havalandırma hızının açığa çıkan su üzerine etkisi (Coppola vd., 1983).

Büyük ölçekli yığın kullanarak yapılan bahçe atıkları ve evsel arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında, Reinhart v.d. (1993) su muhtevasının prosesteki önemini belirlemiştir. Kompostlaştırma esnasında elde edilen pik sıcaklıklar, su muhtevasının %30'un altında olduğu zaman oldukça düşüktür. Pik sıcaklıklar su muhtevası ile yüksek bir korelasyon oluşturmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Kompostlaştırma sırasında elde edilen yüksek sıcaklıklar ile su muhtevası arasındaki ilişki (Reinhart vd., 1993).

Su muhtevasındaki değişim, kompostlaştırma metoduna ve atık yapısına göre de değişmektedir. De Bertoldi v.d. (1982) büyük ölçekli üç kompostlaştırma sisteminde su

muhtevası değişimini incelemişlerdir (De Bertoldi vd., 1982). Evsel katı atık ve evsel arıtma çamuru karışımında başlangıçtaki su muhtevası % 67'dir. Karışımın aktarılmasıyla su muhtevası 15. günde % 43 seviyelerine düşmüş, 30.günde ise % 43'lük su muhtevasında bir değişim gözlenmemiştir. Bunun yanında, statik yığında basınçlı havalandırma yapılması halinde 15. günde % 48, 30. günde ise % 29 su muhtevası elde edilmiştir. Negatif (emme) havalandırma yapılan sistemde 15. ve 30. günlerde ise sırasıyla % 57 ve % 45 su muhtevaları elde edilmiştir. Aktif kompostlaştırma periyodunda su muhtevasının % 45-55 arasında kalması halinde, su muhtevası proses için kısıtlayıcı olmamaktadır.

Kompostlaştırma prosesinin sonunda, nihai kompost %40-45 den daha yüksek bir nem konsantrasyonuna sahip olmamalıdır (WEF, 1995a). Bu oran eleme için yeterlidir. Daha kuru bir kompost toz emisyonunun oluşmasına neden olabilir. Şayet nihai kompost plastik çantalarda paketlenenirse, nem oranı %35'i aşmamalıdır. Aksi halde anaerobik ortam oluşması halinde koku oluşu kaçınılmazdır.

Sürekli beslemeli kompost reaktörlerinde kompost karışımındaki su muhtevası kontrolü, çıkan ürünün (kompost) bir kısmının sistem girişine geri çevrilmesi yoluyla yapılabilir (Haug, 1993).

4.3.2 Sıcaklık

Sıcaklık, kompostlaştırma prosesinde önemli rol oynayan ve aynı zamanda proses hızının bir göstergesi niteliğinde çok önemli bir parametredir. Mikrobiyal bozulma esnasında biyokütle yapısındaki kompleks organik formlar daha basit yapıdaki karbon formlarına oksitlenmektedir. Karbon içeren moleküller parçalanırken karbon atomları arasındaki bağların kopmasından oluşan kimyasal enerji ısıya dönüşmektedir. Bu durumda ne kadar çok bağ parçalanırsa o kadar çok ısı meydana geldiğinden ortamın sıcaklığındaki yükselme biyolojik aktivitenin hızını göstermektedir. Bu yüzden, kompostlaştırma prosesinde oluşan reaksiyon ve ürünler sıcaklıkla değişmektedir. Sıcaklık, aynı zamanda mikrobiyal aktiviteyi etkileyen su muhtevası ile de doğrudan ilişkilidir (Öztürk, 2010).

Havalı kompostlaştırma işlemi, mezofilik ve termofilik ortamlarda gerçekleştirilmektedir. Kompostlaştırmaya katkısı bulunan tüm mikroorganizmalara uygun sıcaklıklar mevcuttur. Kompostlaştırılan atıklarda görülen sıcaklık artışına, solunum metabolizmasındaki ekzotermik reaksiyonlar neden olmaktadır. Sıcaklık 65°C'nin üstüne çıktığında spor yapıcı mikroorganizmalar baskın hale gelirler. Bu safha, durgun bir safha olduğu ve fermentasyon yavaşladığı için fazla istenmez. 55-60°C civarındaki sıcaklıklarda patojen mikroorganizmalar,

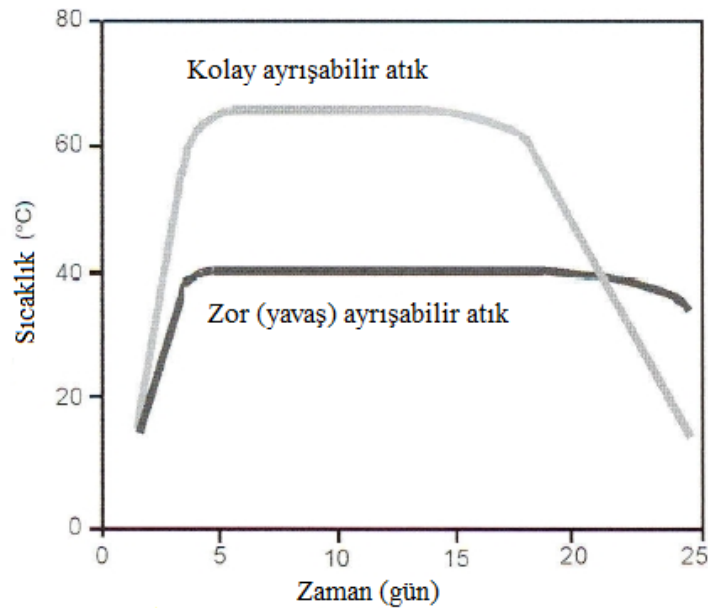
solucan yumurtaları ve bitki tohumları da tahrip edilir. Aktarmalı yığınla kompostlaştırmada genel olarak, aktarmadan sonra yığın sıcaklığı ortam sıcaklığına düşmekte, fakat birkaç saat içinde eski seviyesine geri dönmektedir. Yığın sıcaklığı, 10-15 gün sonra yani biyolojik olarak kolay ayrışabilir maddeler oksitlendikten sonra azalmaktadır (Öztürk, 2010).

Oksijen kullanım hızı, mikrobiyal aktivitenin bir fonksiyonu olduğu için en yüksek oksijen kullanım hızı optimum ayrışma sıcaklığını göstermektedir. Bach vd.(1984) arıtma çamurları için optimum sıcaklığın 60 °C olduğunu rapor etmişlerdir.

Yapılan pek çok kompostlaştırma deneylerinde hızlı parçalanma periyodu boyunca ideal sıcaklığın yaklaşık 55 °C dolayında olduğu gözlenmiştir. 60°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda mikroorganizmaların çeşitliliği büyük oranda azalmaktadır. 70 °C deki toplam biyolojik aktivite 60 °C deki aktivitenin %10-15 i kadar iken, 75-80 °C de hiçbir önemli biyolojik aktiviteye rastlanmamıştır (Strom, 1985).

Macgregor vd. (1981) maksimum CO₂ kaybı ve ısı üretiminin ~55°C sıcaklığında olduğunu bulmuştur. Olgunlaşma safhasında sıcaklık düşmektedir. Olgunlaşma safhasında gerçekleşen nitrifikasyon için optimum sıcaklık 30°C mertebelerindedir.

Kompostlaştırma sürecindeki sıcaklık-zaman profilleri atığın biyolojik olarak ayrışabilirliğinin açık göstergesidir (Şekil 4.5). Biyolojik ayrışabilirliği düşük (yavaş yada zor ayrışan) organik atıklarda sıcaklığın 40°C üzerine çıkması zordur. Bunu önlemek için başka atıklarla karıştırma gerekebilir.

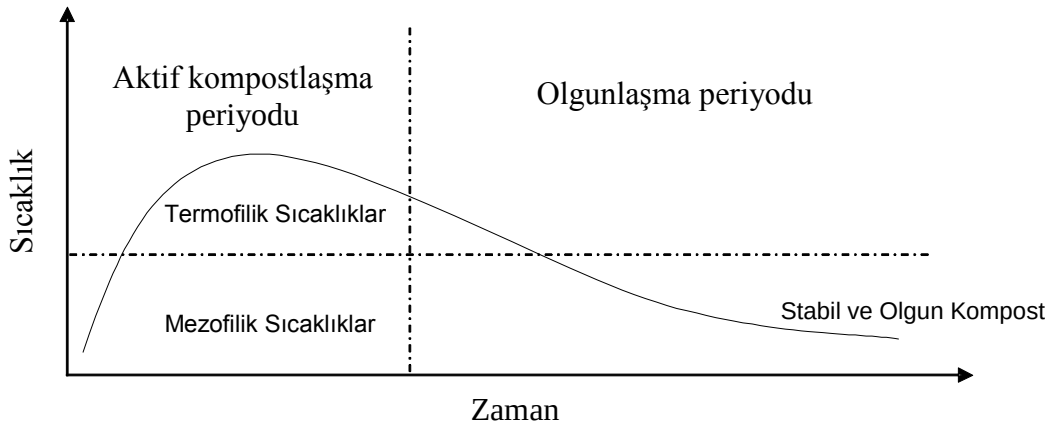


Şekil 4.5 Biyolojik ayrışabilirliği yüksek ve düşük atıklar için sıcaklık profil değişimi (Chiumenti vd., 2005).

Atık patojen içerirse, proses bir kaç gün boyunca 55 °C'nin üzerinde tutulmalıdır. Maksimum mikrobiyal aktivite için kolay ayrışabilen yeterli karbon miktarı mevcutsa, dezenfeksiyon için gerekli sıcaklık prosesin başlangıcında elde edilebilir. Statik yığın ve aktarmalı yığın kompostlaştırma sistemlerinde, kütlenin dış yüzeyindeki sıcaklık merkezinden daha düşük olduğu için, merkezdeki sıcaklığın 55°C'den yüksek tutulması tavsiye edilmektedir. Atığın dezenfeksiyonuna ihtiyaç duyulmuyorsa, düşük sıcaklıklarda daha hızlı stabilizasyon gerçekleşebilir. Bahçe atıkları, evsel katı atıklar ve arıtma çamurları patojenleri ihtiva ettiğinden, bu atıklardan patojen giderimi için kompostlaştırılmanın yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekmektedir.

En iyi sıcaklık kontrolü kapalı statik veya dinamik sistemlerde elde edilir. Statik sistemlerde kontrol daha iyi yapılırken, aktarmalı yığın sistemlerinde kontrol daha zordur. Yığın kütlesi boyunca sıcaklık tam olarak üniform değildir. Kütlenin ortasında sıcaklık yüksek olup kenarlara doğru düşer. Yapılan yığınların yüzey alanı büyüdükçe, ısı kaybı da büyür. Kütleyi veya hacmi büyüttükçe, üretilen ısı artar ve merkezdeki sıcaklık da yükselir. Sıcaklık genellikle prosesin başlangıcında yükselir ve daha sonra azalır

Aktif havalandırılmalı büyük ölçekli kompost proseslerinde, hızlı parçalanma süresince sıcaklık havalandırmayla kontrol edilir. Şekil 4.6 da tipik bir kompostlaştırma süreci boyunca sıcaklık değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 4.6 Kompostlaştırma sürecinde sıcaklığın zamanla değişimi (Epstein, 1997).

4.3.3 Havalandırma

Aerobik kompostlaştırmada yeterli oksijen temini, kompostlaştırma prosesinin en önemli parametresidir. Seçilen kompostlaştırma teknolojisi ve ilk beslemeye bakmaksızın yeterli bir oksijen temini için en az %20-30 gözenek boşluğu olması önerilmektedir (Haug, 1993).

Hava akımı, mikrobiyal reaksiyonlarda üretilen karbondioksit ve suyu, ayrıca ısı transferi ile de ısıyı giderir (soğutma). Isı giderimi, yüksek hızlı, mekanik kompostlaştırma sistemlerinde kısmen önemlidir. Oksijen gereksinimi, proses sırasında değişiklikler göstermekte olup mezofilik kademedede düşer, termofilik kademedede maksimuma yükselir. Bununla beraber, soğuma ve olgunlaşma safhalarında oksijen gereksinimi sifıra doğru azalır. Bazı kapalı, dinamik tipte kompost hücrelerinde yaklaşık 4 m³/saat-ton atık düzeyinde hava gerektiği kompost tesisi işletmecileri tarafından bildirilmektedir. Van der Heide ve Eisma'ya (1997) göre de pratikteki gerçek hava ihtiyacı 2-5 m³/m³.saat aralığında değişmektedir. Chiumenti vd.'ne (2005) göre ise gerekli hava ihtiyacı 10-100 m³/saat-ton atık aralığında değişmektedir. Kompostlaştırma prosesindeki oksijen ihtiyacı, su muhtevası ile ilişkilidir. Ayrıca, kullanılan havalandırma ekipmanları ve fiziksel durum da işletmede oksijen ihtiyacına etki etmektedir.

Yığın şeklinde yapılan kompostlaştırmada, aktarmadan sonraki oksijen ihtiyacı aktarma öncesi oksijen ihtiyacının iki katından daha fazladır. Bunun nedeni, katı partiküllerin parçalanması ve mikrobiyal faaliyet için daha büyük yüzey alanlarının ortaya çıkmasıdır. Aynı zamanda nem miktarındaki azalma ile hava boşluklarının artması da mikrobiyal aktiviteyi arttırabilmektedir. Statik yığınlarda blowerlerin kapatılmasından 20 dakika sonra oksijenin çok düşük seviyelere ulaştığı gözlenmiştir (Thompson, 1984). Bu nedenle, statik yığınla yapılan kompostlaştırmada blowerlerin çalışma aralığı sıcaklık ve zamana göre düzenlenmektedir. Bloweri açıp kapama arasındaki süre yaklaşık 15 dk tutulmaktadır. Kompostlaştırma sürecinin ilk döneminde (hızlı fermentasyon) yığın boşluklarındaki çözünmüş O₂ oranı %5~15 aralığında tutulmalıdır. Daha sonraki dönemde (olgunlaşma) bu oran %1~5 olabilir.

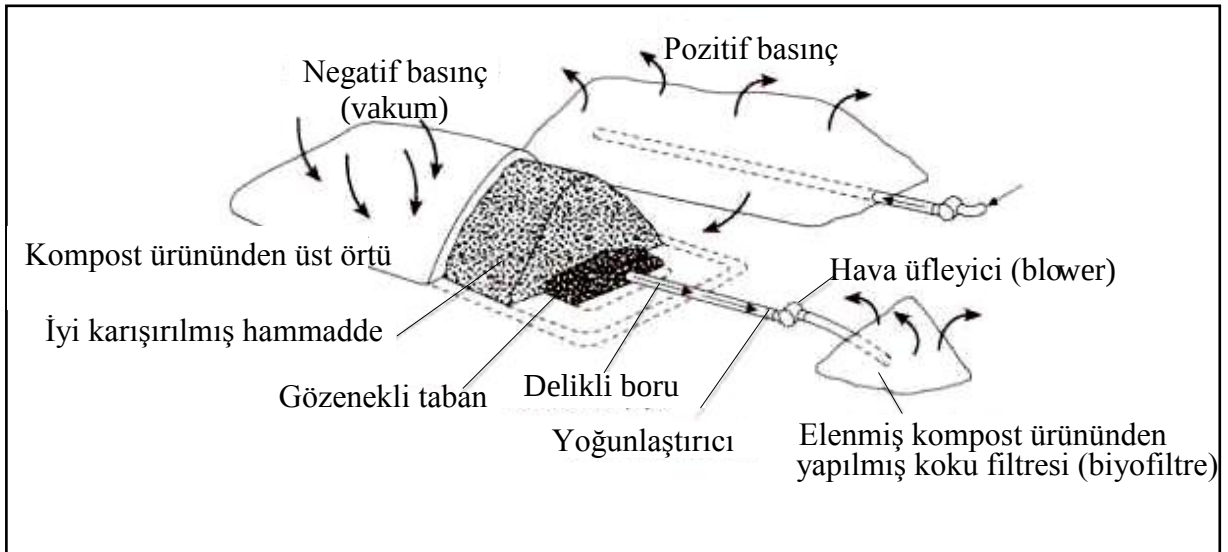
Kaibuchi (1971) pilot ölçekli reaktörde basınçlı havalandırma ile evsel katı atıkların kompostlaştırılmasında en yüksek sıcaklığı 3-4 mg O₂/sa-g UKM havalandırma hızında elde etmiştir. Viel vd. (1987) üç farklı atık üzerinde yaptığı kompostlaştırmada O₂ tüketim hızının birinci günde arttığı, diğer ardışık dokuz günde azaldığını ortaya koymuştur. Yapılan çalışmalar, oksijen tüketimi ve havalandırma hızının atığın yapısına ve kompostlaştırma metoduna bağlı olduğunu göstermiştir.

Statik sistemlerde havalandırma hızı, su muhtevasının giderilmesi (kurutma) açısından oldukça önemlidir. Özellikle, evsel arıtma çamurları ve mutfak atıkları gibi su muhtevası yüksek atıkların kompostlaştırılmasında havalandırma hızı daha da önem kazanır.

Sikora ve Sowers (1985) laboratuvar ölçekli kompost reaktörlerinde, arıtma çamurlarının kompostlaştırılması için gerekli optimum şartları belirlemiştir. Bu çerçevede, sabit hızlı

havalandırma ile sıcaklığı 55°C civarında tutacak sıcaklık kontrollü havalandırmanın, organik maddenin ayrışmasına ve nem giderimi üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Söz konusu çalışmada, sıcaklık kontrollü havalandırmadan çıkan CO₂ miktarının sabit hızlı havalandırmaya göre 2,5 kat ve nemdeki giderimin ise iki kat daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Aktivite ve sıcaklık artışından dolayı, artan hava debisiyle su muhtevasında daha yüksek giderim elde edilmiştir. Böylece daha stabil ve kuru kompost elde edilmiştir. Ayrıca, kompostlaştırmanın gerçekleştiği kapalı bina hacmini saatte 2-3 kez yenileyecek kapasitede havalandırma yapılması önerilmektedir.

Kompostlaştırma prosesinin başlangıcında, hızlı bozuşmadan dolayı daha fazla oksijen talebi olur. Oksijen ihtiyacı aktif havalandırmayla (Cebri ya da vakum), doğal havalandırmayla (difüzyon yada ısı yayımı) yada küçük ölçekli yerlerde ise çevirme ile sağlanır. Cebri havalandırmada, vakumlu havalandırmadan daha fazla verimli enerjiye ihtiyaç vardır. Bunun yanısıra vakumlu havalandırmada kompostlaştırma esnasında çıkan gaz kolaylıkla yakalanabilir. Kompostlaştırma prosesinde havalandırma sistemi ve yığınların şematik gösterimi Şekil 4.7 de verilmiştir.



Şekil 4.7 Kompostlaştırma prosesinde havalandırma sistemi (NRAES 94, 1998).

Çamurun yığında kurutulmasında stokiometrik oksijen ihtiyacından on kat fazla havalandırmaya ihtiyaç duyulabilmektedir. Çizelge 4.3 te kompostlaştırmada hava ihtiyaç oranları farklı nem oranları için hesaplanmıştır. Sıcaklık kontrolünde de kurutma ile benzer şekilde havalandırmaya ihtiyaç duyulur.

Çizelge 4.3 Kompostlaştırma prosesinde farklı oksijen ihtiyaçları (Haug, 1993).

	Toplam hava ihtiyacı (L hava/gr kuru hammadde)
Stokiometrik oksijen ihtiyacına göre hava temini	2,54
Stokiometrik oksijen ihtiyacına göre temin, %50 kullanım	5,08
Kurutma (İlk nem muhtevası %65)	11,40
Kurutma (İlk nem muhtevası %80)	27,60

Kabuller; Organik madde (ilk)%65 ; parçalanma yüzdesi %54,3; stokiometrik oksijen ihtiyacı 2 g-O₂/g – bozuşmuş organik madde ; çıkış nem oranı%35 ; hava özellikleri 1.2 g/L 25° C, 10⁵Pa , 23,4 wt. - %O₂ ;hava sıcaklığı (giriş) 20° C, (çıkış) 60° C

4.3.4 C/N Oranı

C/N oranı, kompostlaştırma prosesi için en önemli çevresel faktördür. Genel olarak C/N oranı biyolojik bozunma prosesi için azotun yeterliliğini göstermektedir. Mikroorganizmaların çoğalmaları için gerekli olan azot dışındaki fosfor, potasyum, kalsiyum, magnezyum, kükürt, demir, kobalt ve çinko gibi diğer nütrientler, organik atıkların içerisinde yeterli miktar ve oranlarda bulunurlar, bu nedenle kompost prosesinin başında sadece C/N oranının ayarlanması gerekebilir. Azot, potasyum ve fosfor gibi inorganik besin maddeleri mikrobiyal büyüme için gereklidir. Azot dışındaki biyolojik olarak parçalanabilen atıklar karbon, sülfür, fosfor, potasyum, magnezyum, kalsiyum gibi makronütrientleri ve mikronütrientleri içerir.

Karbon ve azot mikrobiyal aktivite ve çoğalma için gerekli olup proseste önemli rol oynamaktadır. Karbon ana enerji kaynağı olarak kullanılırken azot da hücre sentezi için gereklidir (Epstein,1997).

Kompostlaştırmaya alınan organik atık bünyesindeki organik karbonun %20-40'ı mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri ile biyokütle sentezi için kullanılır, kalanı ise enerji reaksiyonları ile CO₂'e dönüştürülür. Kompostlaştırmada rol oynayan mikroorganizma biyokütlesi, kuru ağırlık bazında takriben %50 C ve %5 N ihtiva eder. Kompostlaştırılacak organik atıkların N ihtiyacı başlangıçtaki organik C içeriğinin %2-4' ü olup bu miktar ~ C/N = 25/1' e karşılık gelir (Öztürk, 2010).

Topraktaki organik maddelerin C/N oranı değişkenlik göstermekle birlikte ortalama 10 civarındadır. Katı atıkta C/N>35 ise azotun kompostta tamamen tutulacağı, C/N<20 olması halinde ise azotun komposttan sıyrılması ile serbest kalacağı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar, katı atıkta optimum C/N oranının 20-25, maksimum C/N oranının ise 50 olabileceğini ortaya koymuştur. C/N oranı büyük olan bir kompost toprağa verilirse, ürün bünyesindeki mikroorganizmalar çoğalmaları için gerekli azotu topraktan almakta ve toprağı

azot yönünden fakirleştirmektedir. C/N oranı küçük ise komposttaki fazla azot, amonyak gazı olarak kaybolduğundan toprakta yine azot yönünden bir fakirleşme görülmektedir. C/N oranı çok yüksek olan atıklara, azotlu atıkların ilavesi ile bu oran azaltılabilmektedir. C/N oranı çok düşük olan atıklara ise karbonlu atıkların ilavesi ile C/N oranı arttırılabilmektedir. Çeşitli kompostlaşabilir maddelerin azot içerikleri ile kuru ağırlık olarak C/N oranları Çizelge 4.4 te verilmiştir. Çizelgede görüleceği üzere, arıtma çamurlarının C/N oranı düşük, kağıt, odun ve saman atıklarının C/N oranları ise yüksektir (Tchobanoglous v.d., 1993).

Çizelge 4.4 Çeşitli kompostlaşabilir maddelerin azot içerikleri ile C/N oranları (Tchobanoglous vd., 1993).

Madde	N Yüzdesi	C/N Oranı (kuru bazda)
Gıda işleme atıkları		
Meyve atıkları	1,52	34,8
Karışık mezbaha atıkları	7,0-10,0	2,0
Patates kabukları	1,5	25,0
Gübreler		
İnek gübresi	1,7	18,0
At gübresi	2,3	25,0
Domuz gübresi	3,75	20,0
Kümes hayvanları gübresi	6,3	15,0
Koyun gübresi	3,75	22,0
Çamurlar		
Çürütülmüş aktif çamur	1,88	15,7
Ham aktif çamur	5,6	6,3
Odun ve saman		
Kereste hızar hanesi atıkları	0,13	170,0
Yulaf samanı	1,05	48,0
Talaş	0,10	200,0-500,0
Buğday samanı	0,3	128,0
Çam odunu	0,07	723,0
Kağıt		
Karışık kağıt	0,25	173
Gazete	0,05	983
Kahverengi kağıt	0,01	4490
Bahçe atıkları		
Çimen kırpıntıları	2,15	20,1
Yapraklar	0,5-1,0	40,0-80,0

C/N oranı ile aerobik kompostlaştırma süresi arasında aşağıdaki türden bir ilişki bulunmaktadır (Haug, 1993):

C/N = 20 için kompostlaştırma süresi; takriben 12 gün

C/N = 20-50 için kompostlaştırma süresi; takriben 14 gün

C/N = 78 için kompostlaştırma süresi; takriben 21 gün

Kompost prosesinin başlangıcında çoğu atık için en uygun C/N oranı 20-30 arasındadır. Yüksek C/N oranı mikrobiyal parçalanmayı yavaşlatırken, düşük C/N oranı ise azotun amonyak olarak serbest kalmasını sağlar. Bu oranı kontrol etmenin en önemli yolu, ilk beslemenin kompozisyonunun çeşitliliğine bakılmasıdır.

4.3.5 pH

pH kontrolü, mikrobiyal ortamın ve atık stabilizasyonunun değerlendirilmesinde önemli diğer bir parametredir. Kompostlaştırma prosesinde pH, sıcaklığa benzer şekilde zamanla değişmektedir. Kompostlaştırmanın ilk birkaç gününde pH 5 veya daha aşağıya düşer. Bu safhada, çevre sıcaklığındaki organik kütlede içsel mezofilik organizmalar çoğalmaya başlar ve sıcaklık hızla artar. Bu ilk kademenin ürünleri arasında, pH'ın düşmesine sebep olacak basit yapıdaki organik asitler de vardır. Daha sonra, sıcaklık termofilik kademeye ulaşır ve pH havalı prosesin geri kalan kısmı için yaklaşık 8-8,5 değerlerine ulaşır. pH değeri, soğuma kademesinde yavaş yavaş düşer ve olgunlaşmış kompostta 7-8 civarındadır. Havalandırma yeterli değilse, pH 4-5 seviyelerine düşer ve kompostlaştırma prosesi yavaşlar (Öztürk, 2010)

Yüksek asidik ve bazik şartlar altında biyolojik aktivite engellenir. Kompostlaştırma için ideal pH 6- 7,5 arasındadır.

4.3.6 Dane Boyutu

Evsel katı atıkların organik kısmını oluşturan maddelerin çoğu, düzensiz şekillere sahiptir. Bu düzensizlik, organik maddenin kompostlaştırılmadan önce parçalanması ile azaltılabilir. Dane boyutu, birim hacim ağırlığı, içsel sürtünme ve akım karakteristiklerini etkiler. Dane boyutu azaldıkça, mikroorganizmaların faaliyet göstereceği yüzey alanı, dolayısıyla reaksiyonların hızını artırır. Küçük daneler, yığınların içindeki gözeneklerin ve kanalların boyutunu azaltarak birim hacim ağırlığını artırırlar. Bu da, havanın yığının içine, karbondioksitin de yığının dışına difüzyonunu sınırlar ve reaksiyon hızının azalmasına sebep olur. Atık yüksek su muhtevasına sahipse, yüksek birim hacim ağırlığı mekanik aktarma ekipmanlarının aşırı yüklenmesine sebep olur. Bu yüzden, dane boyutları arasında bir uyum sağlanmalıdır.

Mekanik karıştırma ve basınçlı havalandırma yapılan tesislerde dane boyutu, atık parçalanarak 1,5-2 cm civarına getirilmelidir. Doğal havalandırmalı statik ve aktarmalı yığınlarda ise dane boyutu 5 cm'den daha az (max. <8cm) olmalıdır. Boşluk oranının uygun seviyede tutulabilmesi için yığındaki partikül çapının 25-75 mm aralığında olması tavsiye edilmektedir (Chiumenti vd., 2005). Porozite, yığının birim hacim ağırlığı ile de yakinen ilişkilidir. Optimum poroziteyi sağlamak için kompostlaştırılacak atık yığınının birim hacim ağırlığı 0,5-0,6 t/m³ civarında tutulmalı, gerektiğinde boşluk artırıcı katkıları kullanılmalıdır (Öztürk, 2010).

4.3.7 Hacim Artırıcı Malzemeler

Hacim artırıcı madde, öncelikle hacim ağırlığını azaltmak, boşluk oranını artırmak gibi faydalar sağlamak için arıtma çamurlarına eklenen kritik bir katkı maddesidir. Kompostlaştırma işlemini ve son ürün kalitesini direkt olarak etkiler (Metcalf ve Eddy 2003). İdeal hacim maddesi, düşük hacim ağırlığında, kolay ayrışabilir ve olabildiği kadar kuru olmalıdır. Parça boyutu, rutubet miktarı ve emilebilme gibi hacim maddesi karakteristikleri de önemlidir (Corbitt, 1990).

Arıtma çamuru keki % 22 katı konsantrasyonunda olduğunda, % 60 katı oranında alan hacim maddesine eklenerek karıştırılır veya parçalanır. Amaç, kompostlaştırmak için % 40 katı oranındaki karışımı elde etmektedir. Havalandırmalı statik yığın kompostlaştırma işleminde bu konsantrasyon oranı hacim artırıcı madde ve arıtma çamurlarının 2,5:1 veya 3:1 hacim oranında karıştırılmasıyla sağlanabilir (Spellman, 1997).

Hacim artırıcı madde tipine bağlı olarak, mikroorganizmalar için ilave karbon kaynağı sağlayabilir (SSSA, 1994). İlave olarak hacim artırıcı madde yığınlara gözeneklilik sağlayarak havanın yığın içerisine kolay ulaşımını temin eder.

Uzun yıllardan beri fıstık kabuğu, yaprak, ağaç kabuğu, parçalanmış lastikler, mısır koçanı, kağıt, talaş, yonga gibi farklı hacim artırıcı maddeler kompostlaştırmada başarıyla kullanılmıştır. Parçalanmış lastik tek başına kullanıldığında, yığın içerisinde içi anaerobikleşen topraklar oluşturma eğilimi gösterirler. Bu eğilim talaş, lastik-arıtma çamuru karışımına eklendiğinde oldukça azaltılır.

Yığınlarda hacim artırıcı madde olarak yonga kullanılması ise yaygındır. Çünkü yonga kompostlaştırma için, birbirine benzerlik, rutubet emme kapasitesi, kullanım kolaylığı ve kullanılabilir karbon gibi bazı önemli avantajlar sağlarlar. Yonga temininde sert ağaç yongası tercih edilmelidir. Yumuşak yonga kullanıldığında, çok fazla nem emilir ve yapısal

zayıflıklardan dolayı proses sırasında kolaylıkla deforme olurlar. Hacim artırıcı madde deforme olduğunda, hava akımı için kullanılabilir hacimde azalmalar olmaktadır (Diaz vd., 1993). DeBortoldi vd. (1980) arıtma çamuru kompostlaştırmada organik hacim artırıcıların yanında inert hacim artırıcıların da kullanılabildiğini göstermiştir.

4.3.8 Karıştırma

Aktarmalı yığınlar gibi doğal havalandırmalı kompostlaştırma sistemlerinde, yığının alt bölgelerine oksijen difüzyonu, metabolik gereksinimlerden çok daha az olduğundan bu bölgeler havasız (anaerobik) hale gelir. Bu durumda, yığını elle veya bir makina ile karıştırmak havanın bu bölgelere ulaşmasını sağlar. Karıştırma, ayrıca büyük parçaları küçülterek, mikrobiyal reaksiyonlar için yeni yüzeyler oluşturur. Bununla birlikte fazla havalandırma, kompost yığınının aşırı soğuyup, kurumasına, aktinomiset ve mantarların yok olmasına neden olur. Ekonomi ve prosesin gereksinimleri göz önüne alınarak yığınların aktarma sıklıkları belirlenmelidir. Maksimum % 55-60 su muhtevasına ve 15 günlük kompostlaştırma süresine sahip organik bir atığın, ilk olarak üçüncü günde aktarılması tavsiye edilmektedir, daha sonra toplam 4 veya 5 aktarma olacak şekilde belirli günlerde aktarılmalıdır (Chiumenti vd., 2005).

4.4 Kompostlaştırma Teknikleri

Kompostlaştırma için (günümüzde) çok sayıda patent bulunmasına rağmen, nihai ürün talebi ve pazar talebi ile ilgili kısıtlamalar göz önüne alındığında, pek çok sistemin uygun olmadığı anlaşılmaktadır. Bunlar, genellikle, ya çok basit olup hem atık özelliklerine hem de pazar taleplerine cevap verememekte, ya da yüksek yatırım maliyeti ve/veya işçilik gerektirmektedirler. Arıtma çamurlarının kompost yapılarak işlenmesi ile ilgili yaklaşımlar oluşturulurken kompost yapılacak atıkların, elde edilecek nihai ürünün özellikleri ve elde edilen nihai ürünün pazarlanması ile ilgili sınırlamaların mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

Son dönemlerde, çok farklı kompostlaştırma sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerdeki temel fark hızlı bozuşmanın gerçekleştiği fermantasyon alanının dışarıda (reaktörsüz sistemler; açık kompostlaştırma, yığın kompostlaştırma vb.) yada kapatılmış bir alanda (kapalı reaktör sistemler) yapılıyor olmasıdır. Reaktörsüz sistemlerde, kompost prosesi boyunca açığa çıkan gazlar herhangi uygulamaya maruz kalmaksızın (vakumlu havalandırmalı yığın metodu ve havalandırmalı yığın metodunda üstünün kompostla kapatılması hariç) atmosfere karışırlar. Reaktör tip sistemlerde ise oluşan gaz serbest bırakılmadan önce arıtılabilme imkanı vardır.

Arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında kullanılan temel kompostlaştırma teknikleri aşağıda açıklanmıştır.

4.4.1 Aktarmalı Yığın Kompostlaştırma

Aktarmalı yığın kompostlaştırma en eski ve en basit kompostlaştırma sistemi olmakla beraber en çok alana ihtiyaç duyulan teknolojidir. Windrow olarak adlandırılan ve uzatılmış yığınlar halinde açık araziye serilen kompost özel ekipmalarla havalandırma maksadıyla belirli sıklıkta döndürülmesi gerekir. Aktarmalı yığın kompostlaştırma sisteminde koku problemi yoğun olarak yaşanmaktadır. Kompost yığınları ısı döngüsü ve difüzyonun etkisiyle doğal olarak havalıdır. Aktarmalı yığın kompostlaştırma sistemi ve karıştırıcı resmi Şekil 4.8 de görülmektedir.



Şekil 4.8 Aktarmalı kompostlaştırma yığını ve karıştırıcı resmi.

Kompost yığını üzerinde hareket eden aktarma makinesi poroziteyi artırıp kompostun içindeki büyük parçaları parçalarken, diğer taraftan da kompostun homojenizasyonunu sağlar. Böylece yığın içindeki sıcaklık ve nemin eşitlenmesini sağlar. Aktarma makinesi yığındaki kompostu kaldırır, döndürür ve düzelterek yerleştirir. Aktarma makinesinin döndürme sıklığı, yüksek oranda bozuşmanın gerçekleştiği ilk haftalardan nihai ürünün elde edilmesine yakın olan son haftalara doğru azalma gösterir. Hatta bazen son dönemde yığının çevrilmesi ihmal bile edilebilir. Genel bilgi olarak vermek gerekirse, ilk parçalanma ve bozuşmanın yoğun olduğu dönem boyunca, haftada üç defa aktarma yapılır (WEF, 1995b). Aktarma ekipman ve havalandırma tipleri, kompost yığınının boyut ve şekillerine (üçgen yada trapezoidal) bakılarak belirlenir.

Aktarmalı yığın kompostlaştırmada karıştırma ve eleme işlemleri statik yığın kompost sistemine benzerdir. Yığınlar 1-2 m yükseklik ve 2-4,5 m taban genişliğe sahip olacak şekilde

oluşturulur (Metcalf ve Eddy, 2003). Kompost yığının uzunluğu ise atık miktarı ve kullanılabilir alana bağlıdır. Eğer kompostlaştırma sadece açık sistemle yapılacak ise bu sistemle nihai ürün elde etme süresi 8 ile 12 hafta arası değişmektedir. Bu süre kompostun kullanımına ve alan imkanına bağlı olarak 10 aya kadar da çıkabilmektedir.

4.4.2 Statik Yığın Kompostlaştırma

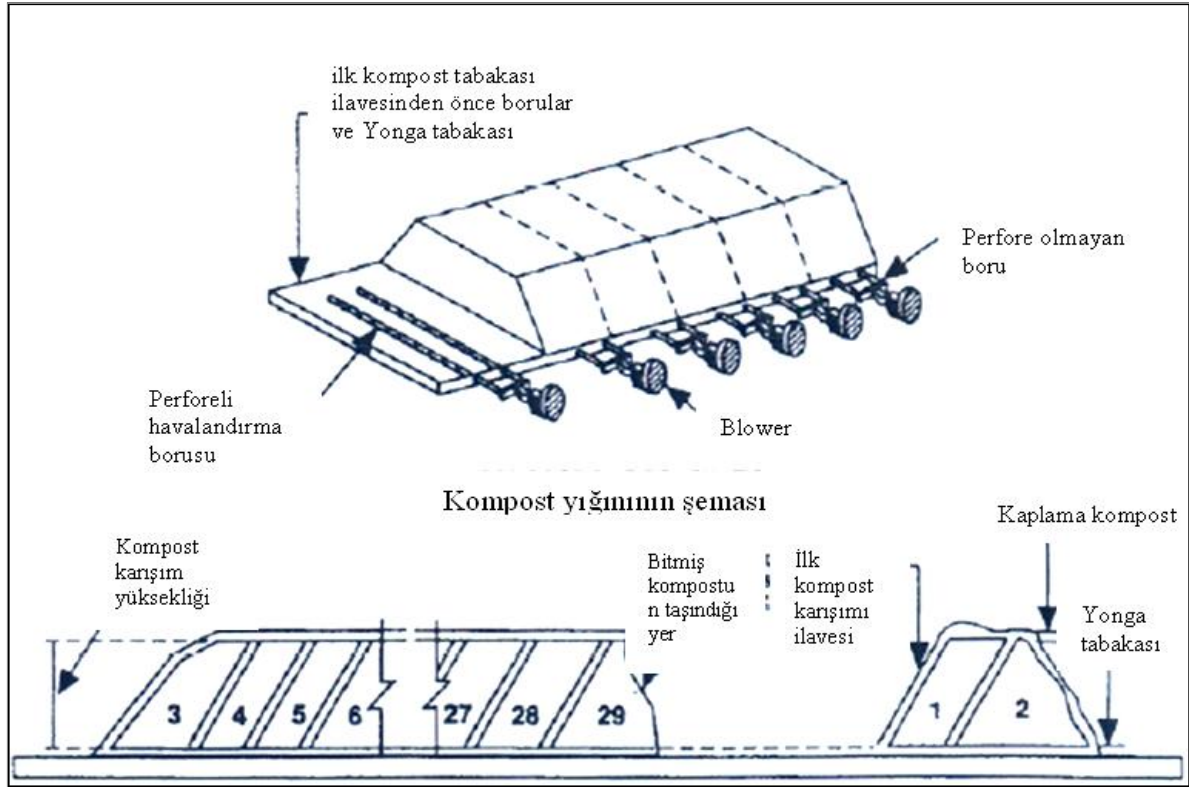
Aktarmalı yığın ile statik yığın kompostlaştırma arasındaki temel fark, statik yığın kompostlaştırmada çevirme ve karıştırma olmamasıdır. Statik yığın karıştırmanın olmaması, kompost içindeki yeterli porozitenin sağlanması yönünden uzun vadede aktarmalı yığın kompostlaştırmadan daha kritik bir hal alır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında en çok statik yığın metodu tercih edilmektedir. Son dönemlerde yapılan uygulamalarda, koku emisyonunu azaltmak amacıyla yığınların üzeri bir çatıyla kapatılmaktadır.

Yığınla kompostlaştırmada genel olarak yarım piramit şekli kullanılmaktadır. Yığının tipik boyutları uzunluğu 12-15 m ve yükseklikte 3 m civarındadır. Bu yükseklik olgun kompost kaplama tabakasını ve ilave metaryelleri de içerir (Haug, 1993). Statik yığın kompostlaştırmada tipik yığın yüksekliği 2 ile 2,5 m arasında değişmektedir (Metcalf ve Eddy, 2003).

Açık yığın kompostlaştırmada genellikle, odun parçacıkları ve kaplama kompostu kullanılarak yapılır. Kaplama kompost olarak bahsedilen olgunlaşmış olan nihai komposttur. Arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında yığın üzerine tabaka halinde nihai ürün olan kompost serilir. Bu sayede arıtma çamurunun üst seviyesinde sıcaklık kaybı önlenmiş olur. Aynı zamanda üstte serilen kompost bir nevi biyofiltre gibi davranarak koku yönetimine yardımcı olur. Bu teknoloji 1970'lerde Beltsville'de geliştirilmiştir (US EPA, 1981).

Zaman kontrollü blowerlar oksijen seviyesinin %5-15 seviyelerinde kalmasını sağlar. Yığın içerisinde istenmeyen sıcaklıkların oluşmaması için Rutgers prosesi geliştirilmiştir ki buda sıcaklık kontrollü blowerlarla sistem kontrol altındadır. İlk ve nihai kompostlaştırma safhalarında, şayet yığın içerisindeki sıcaklıklar ayar noktasının aşağısında ise, sıcaklık geri beslemesi minimum havalandırmayı sağlamak ihmal edilebilir.

Havalandırılmalı statik yığınlarda tipik alıkonma süresi 14-28 günü takip eden en az 30 günlük iyileşme süresidir (WEF, 1995a). Havalandırılmalı statik yığın kompostlaştırma şematik görünümü Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Havalandırmalı statik yığın kompostlaştırma sistemi şematik görünümü.

4.4.3 Kapalı Reaktör Tip Kompostlaştırma

Kapalı reaktör sistemi ile reaktör olmayan sistemler (yığın metodu vb.) arasındaki ana fark, kompostlaştırmanın bir yapı içerisinde yer almasıdır. Bunun sağlayacağı en büyük avantaj ise kompostlaştırma prosesince açığa çıkan gazların toplanıp işlenebilir olmasıdır. Bununla birlikte, kompostlaştırma prosesinde açığa çıkan nemli ve sıcak gaz bu süreçte kullanılan yapının çatı, duvar ve borularında yoğunlaşarak korozyona uğramasına neden olurlar. Açığa çıkan gazın hacmini azaltmak için bazı uygulamalarda kompostlaştırma alanı diğer alanlardan ayrı tutulur.

Arıtma çamurları için, kapatılmış sistemler gibi, çoğunlukla tüneller, hücreler, açık kompostlaştırma ve havalandırmalı yığın metodları da kullanılır. Kapalı sistemlerde, beslemeli yığın üçgen ya da trapezoidal şeklini alır. Bununla birlikte, çoğu uygulamada, beslemeli yığın üzerinde aktarma makinesinin gezebileceği kalın duvarlarla bölünür. Üzeri kapalı olmayan yerlerde ise yığın yüksekliği 2-2,5m dir (Haug, 1993). Kapalı sistemdeki kanal sayısı atık kapasitesi ve önerilen alıkonma süresine bağlıdır.

Reaktör sistemlerde hava, cebri olarak ya da vakumlama yoluyla verilir. Havalandırma ve aktarmanın temel amacı kompostlaştırma sürecini kontrol etmektir. Hava her bir kanalda altta

yer alan manifoldlardan temin edilir ve su ilavesiyle birlikte gerçekleşen havalandırma, her bir tünelde ayrı ayrı kontrol edilir. Bu sistemlerde genelde her bir tünel kendi kontrol fanlarıyla birkaç havalandırma alanına bölünerek, havalandırmanın iyice yapılması sağlanır.

Kompostun aktarılmasında, kompost tünelin başından sonuna doğru hareket eder. Bu sistemle çamurun tipik olarak alıkonma süresi kanallarda 21 gündür. Bunu takiben havalandırmalı yada havalandırmaz yığınlarda 30 günlük olgunlaşma süresi geçirir (Haug, 1993). Biyogenik atıklar için tünellerde gerçekleşen tüm kompostlaşma süresi 6-8 haftadır.

4.4.3.1 In-Vessel Metodu Kompostlaştırma

In-vessel reaktör sistemleri diğer kapalı tip kompost reaktörlerine göre serili kompost üzerinde daha az hava boşluğuna sahiptir ve buda işletilmesi gereken çıkış gazının hacmini azaltır. Bu sistemlerde genelde çıkış gazı biyofiltrelerden geçirilir. Buna ilaveten, havalandırma sistemi belirli uygulamalara göre daha iyi kontrol edilebilir. Arıtma çamurlarının In-vessel sistemleriyle kompostlaştırılması Amerika'da son 15 yıldır kullanılmaktadır. Başlangıçta, bu sistemlerin uygulanmasında bazı ciddi sorunlar (koku, nemin kaybolması, materyallerin işlenmesi vb.) yaşanmıştır (US EPA, 1989). Ancak son 10 yıl süresince, Avrupa'da biyogenik atıkların kaynağında ayrı toplanması yönünde getirilen direktifler doğrultusunda biyogenik atıkların bu sistemlerle kompostlaştırılması giderek yaygınlaşmıştır.

4.4.3.2 Tünel Kompostlaştırma

Tünel kompost sistemi uzun yıllardır katı atıkların ve arıtma çamurların kompostlaştırılmasında kullanılan bir sistemdir. Bu sistemler proses kontrolünün farklı seviyelerinde karıştırma ve yığınlaştırmakla kompostlaştırma sistemlerini içerir. Amerika'da özellikle arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında yatay akışlı reaktör sistemleri kullanılmaktadır.

Önceleri mantar endüstrisinde kullanılan bu kompostlaştırma reaktörleri kontrolleri daha iyi olduğundan ve dizayn ve işletmeleri hakkında uzun yılların verdiği tecrübenin ötürü son zamanlarda yoğun bir ilgi görmektedir. Avrupa'daki bazı üreticiler bu sistemi biyogenik atıklar üzerine adapte etmeye çalışmışlardır. Bu sistemin bir karakteristik özelliği kompost yığının profiline bakıldığında homojen bir sıcaklık nem ilişkisinin olduğu görülmektedir. Buda kompostlaştırmada çıkan gazın resürkilasyonundan kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak bu sistemde homojen bir kompost için minimum bir aktarma ihtiyacı vardır.

Tünel kompostlaştırmada tünel sayıları uygulamanın kapasitesine göre değişir. Tipik bir tünel kompostlaştırma sisteminin boyutları ortalama olarak 30-50m uzunlukta, 4-6m genişlikte ve 2,5-4m yükseklikte dir. Her bir tünel ayrı ayrı kontrol edilir. Prosesin kontrolü taze hava, çıkan gazın geri sirkülasyonu ya da ikisinin karışımının alt yataktan temin edilmesidir. Bu sistemler genellikle bant konveyör sistemleriyle otomatik olarak beslenir.

Tünel sistemlerinde kompostlaştırma süresi bir hafta gibi kısa bir süre ise karıştırma uygulanmayabilir. Tünel sistemlerinde karıştırma yapmanın bir yolu da bir tünelin boşaltılarak diğerine doldurulmasıyla yapılır ki hacim ve kütle kaybı telafi edilir. Bu sistemlerde karıştırma, her bir tünelin üzerine konulan bir düzenekle de sağlanabilir.

4.4.3.3 Kutu ve Konteyner Tipte Kompostlaştırma

Bu tür kompostlaştırma sistemlerinin reaktör üniteleri tünel reaktörlere çok benzer olmakla beraber biraz daha kısadırlar. Kompostlaştırma haznelerinin hacimleri, 50-60 m³ (7x3x3) ten 250m³ kadar çıkmaktadır. Kompostlaştırma kutularına karşın, daha küçük olan kompostlaştırma reaktörleri hacmi 20-25 m³ arasındadır ve bu sistemler taşınabilir ve üstten yüklenebilir. Bir araçla bu konteynırlar proses süresince taşınabilir. Her bir konteynır havalandırmaya ve sızıntı suyu toplama sistemine bağlantılarla ilişkilidir. Proses kontrolü tünel sistemine benzer. Kutu ve konteyner sistemlerinde alıkonma süresi 7-14 gündür ve daha sonra sistem kompostun olgunlaşması ile devam eder.

4.4.3.4 Dikey Akışlı Kompostlaştırma

Dikey akışkanlı reaktörler genel olarak silindirik kuleler ve dikdörtgen reaktörlerden oluşur. Bu sistemler katı atıklardan ziyade daha sık arıtma çamurları için kullanılmaktadır. Bazı kuleler iç katlarda dikey bölmelerle ayrılırlar. Kulelerin hacim aralığı 400 – 1800 m³ ve derinliği ise 6- 9 m arasındadır.

Dikey reaktörler genellikle üstten sürekli yada kesikli olarak beslenir. Kulede kompostlaştırma hareketi yavaş bir şekilde üstten aşağı doğrudur. İç katların ayrılması durumunda, kule içindeki malzeme hareketli ızgara yada flanşlarla dikey olarak hareket ettirilir. Reaktörde aşağı doğru hareket boyunca ara katlar karıştırmayı arttırır.

Kompostlatırmanın verimli olabilmesi için havalandırmanın yeterli olması şarttır. Ancak bazı hallerde yüksek derinlik ve yığının etkili karıştırılamaması kompostun sıkışmasına neden olur. Bu da, kompost içinde anaerobik bölgelerin oluşarak koku sorununun yaşanmasına neden olur.

Dikey kompostlaştırma reaktöründen sonra, reaktör içindeki materyal ya açık kompostlaştırmada iyileştirilir yada ikinci bir kompostlaştırma kulesine doldurularak olgunlaşması sağlanır. Tipik olarak dikey akışlı sistemlerde alıkonma süresi 14- 20 gün arasındadır (Haug, 1993). Çıkan materyalin iyileştirilmesi için başka bir reaktöre konması halinde 2-3 hafta, açık kompostlaştırma yapılması halinde ise 3 ay kadar bir süre gereklidir.

4.5 Arıtma Çamurlarının Kompostlaştırılması İle İlgili Literatür Çalışmaları

Arıtma çamurlarının kompostlaştırılması ile ilgili son yıllarda yapılan anahtar çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Liang vd., 2003

Liang vd. (2003), arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında sıcaklık, su muhtevası ve mikrobiyal aktivite arasındaki ilişkileri, 6 farklı sıcaklık (22, 29, 36, 43, 50, and 57 °C) ve 5 farklı su muhtevası (% 30, 40, 50, 60 ve 70) için tam kontrollü inkübasyon deneyleriyle incelemişlerdir. Mikrobiyal aktivite bilgisayar kontrollü respirometre ile O₂ tüketim hızı ölçülerek belirlenmiştir. Araştırmacılar, kompostlaştırmadaki mikrobiyal aktiviteye etki eden en önemli faktörün su muhtevası olduğunu, 1,0 mg/g/saat'ten daha yüksek bir biyolojik aktivite için minimum %50 su muhtevasının sağlanması gerektiğini belirlemişlerdir. Buna göre arıtma çamurlarının kompostlaştırılmasında sıcaklık da önemli bir faktör olmakla birlikte, su muhtevasına nazaran etkisi daha azdır.

Margesin vd., 2006

Margesin vd. (2006), arıtma çamuru ve çalı parçalarının hacimsel olarak 40/60 lık karışımının Avrupa Alp'lerinde kış sezonunda soğuk iklim şartları altında kompostlaştırılmasının fizibilitesini araştırmışlardır. 10,1 ila -0,2 °C lık maksimum ve 2,2 ila -3,6 °C değişen minimum ortam sıcaklıklarında yığın içerisindeki sıcaklık 66 °C'ye ulaşmıştır. 1. yığın, 2. yığına göre daha sık (haftada iki) karıştırılmıştır. Bu durum ısı kaybına ve kurumaya neden olmuş ve C/N oranında düşük giderim, enzim aktivitesinde, solunumda ve biyokütlede azalma ile toksisite (*Lepidium sativum* büyümesinin inhibisyonu) gibi mikrobiyal proses üzerine negatif etkiler gözlenmiştir. Komposttaki kuru madde ile biyolojik parametreler arasındaki önemli negatif korelasyon, mikrobiyal aktivitenin kurumaya karşı oldukça hassas olduğunu ve düşük su muhtevasının düşük ortam sıcaklığından daha kısıtlayıcı bir faktör olduğunu göstermiştir.

Gea vd., 2007

Gea vd. (2007), yağ bakımından zengin atıkların geri dönüşümü amacıyla, arıtma çamurlarının hayvan yağı karışımları ile birlikte kompostlaştırılması üzerine çalışmıştır. Kompost kalitesinde uluslararası hijyen şartlarının sağlanması ve aşırı termofilik kompostlaştırma süresinden kaçınmak için yağ/çamur karışımında maksimum yağ içeriği %30 olarak tavsiye edilmiştir. Bu şartlar altında yağ içeriğinde %85'lik bir azalma gerçekleştirilmiştir. Solunum hızı değerlerinde görüldüğü gibi biyolojik aktivite su muhtevasına oldukça bağlıdır. Yağlar hidrofobik bir yapıda olduğundan, su muhtevası kritik bir kontrol faktörüdür ve yağların kompostlaştırılmasında %40'ın üzerinde su muhtevası sağlanmalıdır. 69 günlük bir prosesten sonra elde edilen kompost biyolojik indeksleri (Olgunluk derecesi:IV, solunum indeksi:1,1 mg O₂/g org. mad./saat), ürünün yüksek stabiliteye ve olgunluk seviyesine sahip olduğunu göstermiştir. Kompostlaştırma prosesi boyunca yağların hidrolizinden sorumlu lipazlar gözlenmiştir. Lipazın stabilitesi için optimum koşullar 38,3 °C ve pH 7,97 olmakla birlikte, maksimum lipolitik aktivite termofilik koşullarda gözlenmiştir.

Tognetti vd., 2007

Tognetti vd. (2007), kentsel katı atıklardan (KKA) elde edilen kompostun kalitesini arttırmak amacıyla, kentsel katı atıklarla evsel atıksu arıtma çamurlarının (AÇ) 3 farklı oranda 9 m³ lük yığınlarda (KKA:AÇ oranı sırasıyla 1:1, 2:1 ve 3:1 (hacim bazında)) birlikte kompostlaştırılması ile solucanlarla kompostlaştırılmasını (vermicomposting) araştırmışlardır. Çalışma süresince pH, elektrik iletkenliği, karbondioksit üretimi, organik madde, toplam azot, suda çözünür karbon, nitrat, amonyum ve ekstrakte edilebilir fosfor parametreleri ölçülmüştür. 120 günlük çalışma sonuçlarına göre organik madde ve toplam azot parametreleri göz önünde alındığında, KKA ve arıtma çamurlarının birlikte kompostlaştırılmasının (organik madde ~ %39-45, toplam azot %1.7-2 ve ekstrakte edilebilir fosfor 542-722 mg/kg) KKA'nın tek başına kompostlaştırılmasına (%18 organik madde, %0,7 toplam azot ve 128 mg/kg ekstrakte edilebilir fosfor) göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Deneme yapılan 1:1 oranlı yığında su muhtevası oldukça yüksek olmuş ve sıcaklık yükselmesi gözlenmemiştir. Sadece 2:1 ve 3:1 karışımları kompostlaştırma için uygundur ve benzer kalitede ürün elde edilmiştir. Ancak 2:1 oranlı yığın, daha sık karıştırma gerektirmiş olup daha yüksek azot kayıpları gözlenmiştir. Solucan kompostlaştırması ile yapılan kalite iyileştirmesi ise sınırlı olmuştur ve konvansiyonel yığınlarla karşılaştırıldığında, organik madde ve toplam azot konsantrasyonlarında etki görülmemiş, sadece nitrat ve ekstrakte

edilebilir fosfor konsantrasyonlarında bir artış gözlenmiştir.

Fourti vd., 2008

Fourti ve diğ. (2008), kentsel katı atıklar (KKA) ile KKA ve arıtma çamuru karışımının kompostlaştırmasında mikrobiyal parametreleri ve önemli mikrobiyal toplulukların (patojen ve patojen olmayan) değişimini incelemişlerdir. Sonuçlar, W1 yığını (% 100 KKA) ile W2 yığnında (% 60 KKA ve % 40 arıtma çamuru karışımı) hidrojenaz aktivitesi ve Biyokütle C / Biyokütle N oranının termofilik faz (~ 100 gün boyunca, > 45 °C) süresince önemli derecede arttığını, dolayısıyla yüksek mikrobiyal aktivitenin olduğunu göstermiştir. Termofilik fazda, fekal indikatör bakteride 2 Ulog10 azalma elde edilmiş olup, *Staphylococcus aureus* ve *Salmonella* ise tamamen giderilmiştir.

Yañez vd., 2009

Yañez vd. (2009), laboratuvar ölçekli reaktörlerde katkı maddesi olarak gümüşi akasya ağacı (*Acacia delbata*) (A) yongalarını kullanarak 4 farklı (ağırlık bazında) oranda (Karışım 1 (M1) (A (100%) + SS (0%); A/SS oranı 1/0), Karışım 2 (M2) (A (50%) + SS (50%); A/SS oranı 1/1), Karışım 3 (M3) (A (33,3%) + SS (66,6%); A/SS oranı 1/2), Karışım 4 (M4) (A (25%) + SS (75%); A/SS oranı 1/3)) evsel atıksu arıtma tesisi çamuru (SS) ve katkı maddesinin 35 kg lık karışımının kompostlaştırılmasını araştırmıştır. 83 günlük (43 gün aktif + 40 gün olgunlaştırma) kompostlaştırma süresince sıcaklık, organik madde, pH, CO₂, O₂, C/N oranı, TKN ve olgunlaşma indeksi parametreleri izlenmiştir. Tüm parametreler katkı maddesi miktarından etkilenmiştir. En yüksek sıcaklık 64 °C ile M3 karışımında (A/SS oranı 1/2) elde edilmiş, diğer karışımlardaki sıcaklıklar, M4 (A/SS oranı 1/3) için 52 °C, M2 için (A/SS oranı 1/1) 48 °C ve M1 için (A/SS oranı 1/0) 46 °C olarak gözlenmiştir. Kullanılan kinetik model, kompost karışımında arıtma çamuru oranının azaltılmasının prosesi olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, arıtma çamuru oranı arttıkça, izlenen proses parametreleri pozitif yönde artmıştır. Bu nedenle gümüşi akasya ağacı (*Acacia delbata*) yongası ile evsel atıksu arıtma çamuru karışımının kompostlaştırılması için optimum yonga/çamur (A/SS) oranının 1/1 olduğu sonucuna varılmıştır.

Nakasaka vd., 2009

Nakasaka vd. (2009), termofilik kompostlaştırılma süresince organik madde giderimi ve mikroorganizma topluluğundaki değişimi iki farklı anaerobik çamur (yüksek konsantrasyonlarda protein içeren mezofilik metan fermentasyonu çamuru (S çamuru) ve yüksek konsantrasyonlarda lipid ve fiber içeren termofilik metan fermentasyonu çamuru (K

çamuru) için karşılaştırmışlardır. Organik madde giderimindeki farklılık, organik madde bileşimindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Kompostlaştırma prosesinde, S çamurundan üretilen CO₂ miktarı ve protein ayrışmasından kaynaklanan NH₃ üretimi K çamuruna nazaran daha yüksektir. Farklı çamurların kompostlaştırılmasında mikroorganizma topluluğundaki farklılıklar PCR-DGGE metoduyla belirlenmiştir. S çamuru kompostlaştırılmasında, yüksek organik madde ayrıştırma aktivitesine sahip bir ayrıştırıcı olarak bilenen *Ureibacillus sp.*, K çamuru kompostlaştırılmasında ise lignoselülozik ayrışma için enzimler üreten bir termofilik aktinomiset olarak bilinen *Thermobifida fusca* gözlenmiştir.

Ponsa' vd., 2009

Ponsa vd. (2009), farklı hacimsel oranlardaki (1:2 (Yığın 1), 1:2.5 (Yığın 2) ve 1:3 (Yığın 3)) arıtma çamuru ve budama atıkları karışımlarının ~ 100 m³ lük full-scale karıştırılmalı yığınlarda (genişlik 4 m; yükseklik 1.5 m; uzunluk 30–40 m) proses performansına etkisini incelemişlerdir. Yığınlarda sıcaklık, oksijen gibi rutin parametrelerle organik madde, su muhtevası, C/N oranı kimyasal parametreleri ile proses sıcaklığında (RI_{proses}) ve 37 °C'de solunum indisi (RI₃₇) parametreleri ölçülmüştür. Yığınlarda farklı etkiler gözlenmiştir: Yığın 1'de hijyen için gerekli sıcaklıklar ile tipik kompostlaştırma prosesinde gözlenen RI_{proses} değerleri sağlanamamıştır; Yığın 2 ve 3 benzer davranış göstermiş olup, yüksek biyolojik aktiviteden dolayı uzun periyotlarda termofilik sıcaklıklara ve yükek RI_{proses} değerlerine ulaşılmıştır. Üç yığından elde edilen kompost kalitesi stabilite (RI₃₇), Dewar ısınma testi ve olgunluk (bitki çimlenme indeksi) parametreleri açısından karşılaştırıldığında, Yığın 3 kompostunun en stabil olduğu belirlenmiştir. Araziye uygulama için gerekli hijyen ve belli bir stabiliteye ulaşmak açısından, arıtma çamuru kompostlaştırmasında arıtma çamuru katkı malzemesi oranının oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Hua vd., 2009

Hua vd. (2009), arıtma çamuru kompostlaştırmasında bambu kömürü partiküllerinin azotun korunması ile Cu ve Zn'nin mobilitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, 200 kg kompostlaştırma materyali (180 kg arıtma çamuru ve 20 kg lık şalgam tohumu) karışımına, ağırlık bazında % 9 bambu kömürü ilavesinin 0,4m³ lük havalandırılmalı statik yığın kompostlaştırmada (1,0m×0,4m×1,0 m boyutlarında) azot kaybını % 64 azalttığını, ekstrakte edilebilir Cu ve Zn miktarını da sırasıyla %44 ve % 19 oranında azalttığını göstermiştir. Araştırmacılar, azotun korunmasında ve metallerin azaltılmasında (tutulmasında) başlıca faktörün bambu kömürünün amonyak adsorpsiyon kapasitesi ve metallerin bambu kömürüne adsorpsiyonu olduğunu belirlemişlerdir.

Trémier vd., 2009

Trémier vd. (2009), arıtma çamurları kompostlaştırmasında organik madde ayrışmasını optimize etmek için başlangıç su muhtevası ve katkı malzemesi partikül büyüklüğü dağılımının etkisini araştırmışlardır. 300 litrelik yalıtımlı laboratuvar ölçekli kompost reaktörlerinde arıtma çamuru ile katkı malzemesi (yeşil atıklar ve parçalanmış tahta pelletleri) kuru ağırlık bazında 1/6 oranında karıştırılmış ve farklı su muhtevası (% 20-70) ve partikül büyüklüğü dağılımlarında (8-40 mm), 10 farklı karışım kompostlaştırma prosesine tabi tutulmuştur. Çalışmada, O₂ tüketimi, sıcaklık, kompost konsolidasyonu ve hava dağılımı izlenmiş olup, elde edilen sonuçlara göre, su muhtevası O₂ tüketimini, dolayısıyla organik madde ayrışmasını doğrudan etkilemiştir. Katkı malzemesi partikül büyüklüğü ve su muhtevası, kompost konsolidasyonu ile birlikte hava dispersiyonunu etkilemiştir. Optimum koşullar, % 55 su muhtevası ve 20-30 mm büyüklüğünde yeşil atıklar kullanmak suretiyle elde edilmiştir.

5. DENEYSEL YAKLAŞIM

Çalışma kapsamında biyolojik arıtma çamurlarının tek başına, ayrıca ilave karbon kaynağı olarak prekot çamuru ve organik evsel atıklarla birlikte havalı ortamda kompostlaştırılarak stabilizasyonu araştırılmıştır. Çalışmalar üç ayrı deneme olarak tamamlanmıştır. Birinci denemede 12 adet pilot reaktörde iki paralelli çalışmalar yürütülmüş, biyolojik çamurların aerobik stabilizasyonunda ilave karbon kaynağı olarak prekot ve organik evsel atığın etkisi yanında yonga ve sentetik hacim artırıcı malzemelerin de etkisi ortaya konmuştur. İkinci deneme tam ölçekli 3 adet aktarmalı ve 4 adet statik yığında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda aktarmalı yığın ile statik yığınlardaki biyolojik çamur aerobik stabilizasyonu ile prekot ve organik atığın etkisi araştırılmıştır. Sonuncu deneme ise tam ölçekli 4 adet statik yığında gerçekleştirmiş olup, biyolojik arıtma çamurlarının, prekot ve evsel organik atık ile birlikte aerobik stabilizasyonu araştırılmıştır.

Denemelerde kullanılan evsel atıksu biyolojik arıtma çamuru İSKİ Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisi biyolojik kısımdan gelen çamurun proses edildiği santrifüj ünitesinde bir günde üretilen çamurdan kompozit olarak temin edilmiştir. Paşaköy Atıksu Arıtma Tesisi 2000 yılında devreye alınmış ve daha sonraki kapasite artırımıyla birlikte 200.000m³/gün lük arıtma kapasitesine sahiptir. Tesis fiziksel-biyolojik atık su arıtma prosesine sahip olup bu proses ön arıtma, biyolojik olarak fosforun giderilmesi, denitrifikasyon, nitrifikasyon ve son çöktürme aşamalarını içermektedir. Gerekli olan biyolojik arıtma anaerobik, anoksik ve havalandırılmış bölgelerden, çökeltme tanklarından, geri dönüş ve fazla çamur pompa istasyonlarından ve blower binasından oluşmaktadır. Fazla çamurun uzaklaştırılması, direkt susuzlaştırma ve çamur kurutma ünitelerinden oluşmaktadır. Arıtma tesisi, biyolojik kısmında çamur yaşı 17 gün ve F/M oranı 0,1/gün olarak işletilmektedir.

Denemelerde kullanılan evsel organik atık, İBB Kemerburgaz Kompost ve Gerikazanım Tesisi 80mm elek altından bir günlük atık girişinden kompozit olarak temin edilmiştir. Kompost tesisine gelen karışık evsel atıklar, kabul alanına alındıktan sonra mobilya gibi büyük hacimli kısımlar ayıklanarak 80mm delik çapına sahip ve içerisinde poşet yırtıcı bıçakları bulunan döner eleğe beslenmektedir. Elek altına geçen kısım organik fraksiyon olarak kabul edilmekte ve kompostlaştırmak amacıyla fermentasyon alanlarına beslenmekte olup elek üstü malzeme ise geri kazanım hattına gönderilmektedir.

Çalışmada kullanılan prekot çamuru ise, birinci ve ikinci denemelerde Cargill Orhangazi mısır işleme fabrikasından, son denemede ise Cargill Pendik mısır işleme fabrikasından temin edilmiştir. Prekot çamuru, mısır işleme endüstrisinden çıkan organik içeriği oldukça yüksek

bir biyokatıdır. Mısır işleme proseslerinde basınç altında çalıştırılan vakum tamburunun yüzeyine su ile hazırlanmış perlit çözeltisi takriben 10cm kalınlığında sardırılmaktadır. Bu işlemten sonra, glikoz şurubu tambura beslenerek yine vakum altında, ürün perlit keki içinden geçirilerek vakumun bağlı olduğu tankta toplanmaktadır. Tambur yüzeyinde glikoz şurubu içindeki kaba proteinler, bir miktar glikoz, yağ ve diğer organiklerde tutulmaktadır. Yüzeyde tutulan bu kaba proteinler, yüzeden kazınarak alınmakta ve kazınan bu malzeme prekot olarak isimlendirilmektedir. Dolayısıyla prekot; protein, yağ, karbonhidrat ve perlit içermektedir.

Evsel atıksu biyolojik arıtma çamuru, prekot ve evsel organik atık deneme başlangıcında eş zamanlı olarak temin edilerek bekletilmeden reaktörlerde ve yığınlarda kullanılmıştır.

Dolgu malzemesi olarak kullanılan yonga deneyin gerçekleştirildiği alanda odun kırıcı ve elek sistemi kullanılarak hazırlanmıştır. Reaktörlerde kullanılan sentetik malzeme; yoğunluğu 0,24 kg/l, çapı 3cm ve boyu 5cm olan spiral plastik boru parçalarından oluşturulmuştur.

Prosesin izlenmesinde öncelikli olarak; sıcaklık, pH, iletkenlik (EC), su muhtevası, organik madde (OM), amonyak ve suda çözünen karbon (KOİ) ölçülmüştür.

Katı numuneler üzerinden yürütülen deneysel çalışmadaki parametreler “Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC)” tarafından belirtilen yöntemler doğrultusunda ölçülmüştür. Buna göre; su muhtevası numune alındığı gün doğrudan 75°C’lik etüvde sabit tartıma gelene kadar kurutularak, OM miktarı ise kuru numunenin 550°C’de 2 saat yakılması ile belirlenmiştir.

Katı numunenin 1:10 sulu çözeltisinde pH, bu çözeltinin santrifüj edilmesinden sonra üst fazında ise iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Suda çözünen karbon miktarı da (KOİ) 1:10 sulu çözelti haline getirilen yaş numunenin santrifüjden geçirilerek 0,45µm’lik filtre kağıdından süzülmesinden sonra yapılmıştır. Amonyak (NH₃-N) konsantrasyonu yine katı numunenin 1:10 sulu çözeltisinin santrifüj edilmesinden sonra üst fazının 0,45µm’lik filtre kağıdından süzülen kısmında bakılmıştır.

Ağır metaller ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy), C ve N değerleri LECO CN cihazı ile ölçülmüştür.

Çalışma kapsamında yapılan analizlerin denemelere göre dağılımı Çizelge 5.1 de, kullanılan analiz metotları ise Çizelge 5.2 de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Yapılan analizlerin denemelere göre dağılımı.

		Birinci deneme: Pilot reaktörler	İkinci deneme: Aktarmalı ve statik yığınlar	Üçüncü deneme: Statik yığınlar
Başlangıçta ve nihai kompost ürününde	pH(1/10 sulu çözelti)	√	√	√
	İletkenlik (1/10 sulu çözelti)	√	√	√
	Su muhtevası	√	√	√
	Organik madde (kuru öğütülmüş numune)	√	√	√
	C/N oranı	√	√	√
	TKN (kuru öğütülmüş numune)			√
	Amonyak (1/10 sulu çözelti)	√	√	√
	KOI (1/10 sulu çözelti)	√	√	√
	Ağır Metaller	√	√	√
	Fosfor		√	√
	Yoğunluk	√	√	√
	Respirometre			√
Haftalık olarak alınan numunelerde	pH(1/10 sulu çözelti)	√	√	√
	İletkenlik (1/10 sulu çözelti)	√	√	√
	Su muhtevası	√	√	√
	Organik madde (kuru öğütülmüş numune)	√	√	√
	Amonyak (1/10 sulu çözelti)	√	√	√
	KOI (1/10 sulu çözelti)	√	√	√
Her gün	Sıcaklık:	10 dakikada bir on-line	√	√
Tür tayini				√

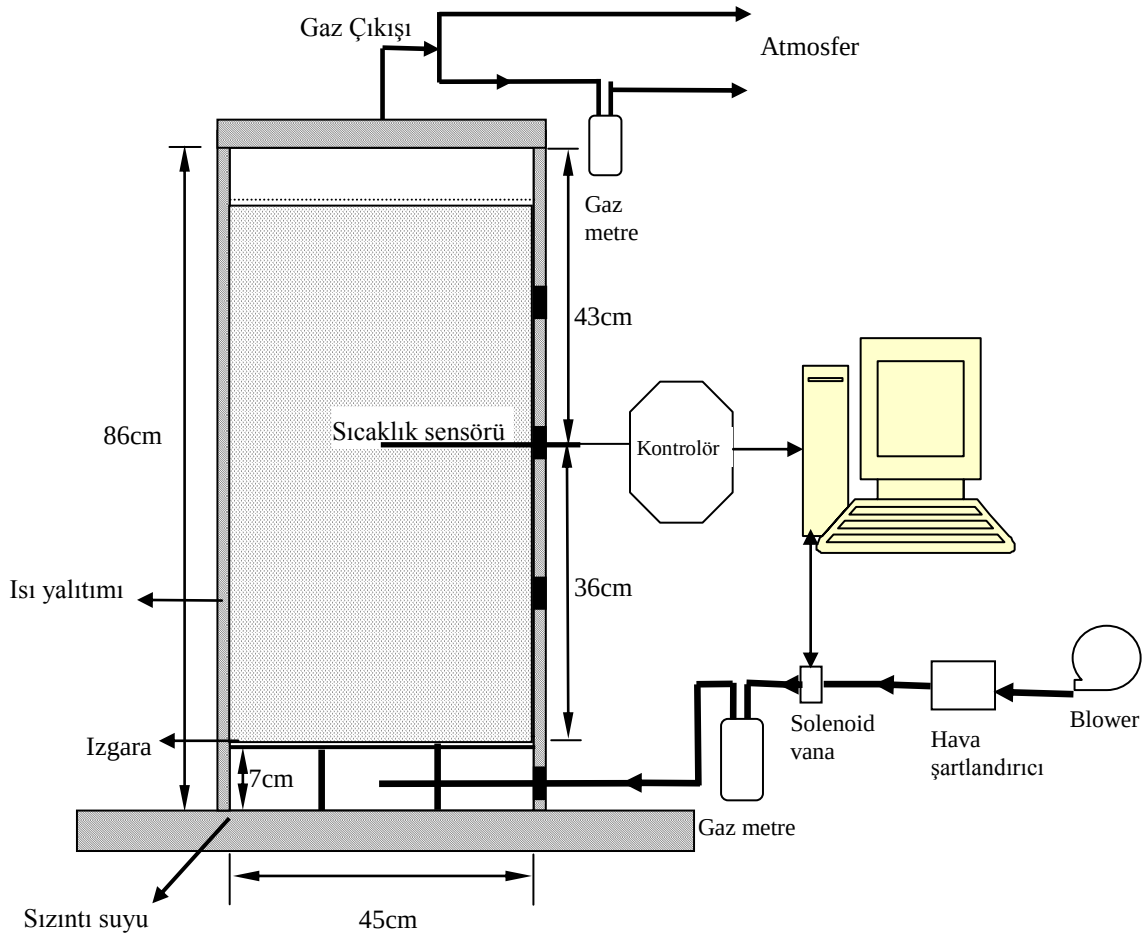
Çizelge 5.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan analiz metotları.

Parametre	Standart Adı	Analiz Yöntemi
pH	TS 12072/1996/Eylül/96	Çözünmüş numunede elektrometrik metot
İletkenlik	SM 2510 B /2005	İletkenlik ölçer
Su muhtevası, 75 C	TS 10459/11/1992	Katı atıklarda rutubet tayini
Su muhtevası, 105 C	TS 9546 EN 12880/04/02	Çamurların karakterizasyonu-kuru kalıntı ve su muhtevası tayini
TOC (Orijinal atıkta)	TS 12089 EN 13137	TOC cihazı ile yüksek sıcaklıkta yakma
Toplam çözünmüş karbon	SM 5310 B-2005	TOC cihazı ile yüksek sıcaklıkta yakma
Çözünmüş inorganik karbon.	SM 5310 B-2005	TOC cihazı ile yüksek sıcaklıkta yakma
Toplam uçucu madde	SM 2540 E/2005	Gravimetrik
Toplam karbon	TS ISO10694/Aralık1995	Kurutulmuş numunenin 950 °C de yakılması
Toplam azot	TS ISO 13878/Mart 2001	Kurutulmuş numunenin 950 °C de yakılması
TKN	SM 4500-Norg.B/2005	Macro-Kjeldahl metot
Amonyak	SM 4500-NH3 B/2005	Distilasyon+Titrimetrik metot, elektrot metodu
KOİ	SM 5220 D/2005	Closed Reflux, colorimetric method
Hg	İşletme içi metot	ICP optik emisyon spektrofotometrik metot
Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	TS EN 11885/04/1998	ICP optik emisyon spektrofotometrik metot
Toplam fosfor	TS EN 13346/Mart 2003	ICP optik emisyon spektrofotometrik metot
Ortofosfat fosforu	SM 4500-P D /2005 TS 10304-1 /04/1997	Kalay klorür ile kolorimetrik metot, iyon kromatografi metodu
Eluat hazırlama	TS EN 12457-4/Ocak 04	Çözme+Süzme
Asitte çözünürleştirme	TS EN 13346/Nisan 98	Kral suyunda özütleme-mikrodalga fırın
Sıcaklık	Dijital Prob Metodu	Isı ölçer
Öğütme	İşletme içi metot	Diskli ve bıçaklı öğütücü ile öğütme
Numune alma	TS 9545 EN ISO 5667- 13/Nisan02	Yerinden alma
Ağır metal ön işlemi	TS Standartları	Kurutma+Öğütme+Kurutma

5.1 Pilot Reaktör Çalışmaları

Çalışma kapsamında biyolojik arıtma çamurlarının tek başına, ayrıca ilave karbon kaynağı olarak prekot çamuru (mısır işleme fabrikası biyolojik arıtma çamuru) ve organik evsel atıklarla birlikte havalı ortamda kompostlaştırılarak stabilizasyonu araştırılmıştır. İlave olarak, farklı hacim arttırıcı maddelerin (yonga/sentetik malzeme) etkisi ortaya konmuştur. Ayrıca yürütülen çalışmada reaktör kompostlaştırma süreci kinetik katsayıları hesaplanmıştır.

Pilot reaktörlerde havalandırmalı kesikli sistem kullanılmıştır. Havalandırmalı pilot reaktör kompostlaştırma sisteminin şematik gösterimi Şekil 5.1 de, resimleri ise Şekil 5.2 de verilmiştir. Reaktörlere 0,5 bar lık hava, bir üfleyici (blower) vasıtasıyla debisi bir gazmetre ile ölçülerek sağlanmıştır. Hava debisi, kurulan otomasyon sistemi ile reaktöre giren hava boruları üzerindeki solenoid vanalar yardımıyla ayarlanmıştır. Sistem, sıcaklığın 65°C 'yi aşması halinde sürekli havalandırma yapılarak sıcaklık 65°C 'nin altına indirilecek şekilde otomatik olarak kontrol edilmektedir. Havanın atık yığınının içine homojen olarak dağılmasını sağlamak üzere reaktör tabanından 7 cm yükseklikte ızgaralar konulmuştur.



Şekil 5.1 Pilot kompost reaktörün şematik görünümü.



Şekil 5.2 Pilot reaktörlerin resimleri.

Atık kütlesinin sıcaklığını korumak, çevreye ısı kaybını önlemek amacıyla reaktörün yan tarafları 3 cm lik, üst kısmı 5 cm lik, yalıtım malzemesiyle kaplanmıştır. Reaktör, polietilen malzemeden imal edilmiş olup faydalı hacmi yaklaşık 120 litredir. Hava, reaktörün yan tarafında tabana yakın bir kısımda açılan bir giriş ile reaktör tabanına verilmekte, buradanda ızgaranın altından ϕ 12 lik paslanmaz çelik bir boruyla tam ortadan eşit olarak reaktör içine dağılmaktadır. , Hava çıkışı ise, reaktörün üstüne yerleştirilen plastik boruyla sağlanmaktadır.

Genel olarak, kompostlaştırma süresince sisteme verilecek oksijenin 4-14 $\text{mgO}_2/\text{st-grUKM}$ aralığında kalması tavsiye edilmektedir (Haug, 1993).

Van der Heide ve Eisma'ya (1997) göre de pratikteki gerçek hava ihtiyacı $2\text{-}5 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{sa}$ aralığında değişmektedir. Chiumenti vd.'ne (2005) göre ise gerekli hava ihtiyacı $10\text{-}100 \text{ m}^3/\text{sa.ton}$ atık aralığında değişmektedir

Pilot reaktörlerdeki hava debileri, havalandırma borularındaki solenoid vanaları yardımıyla otomasyon sistemi ile kontrol edilmiştir. Proses süresince reaktörlere 15 dakikalık periyotlarla saatte yaklaşık $0,7\text{m}^3$ hava verilmiştir. Bu değer, reaktörlerde $10\text{-}17 \text{ m}^3/\text{saat.ton}$ aralığına karşılık gelmekte olup tavsiye edilen aralıkta kalmıştır.

Pilot reaktörlerde kullanılan malzemelerin oranları Çizelge 5.3 te verilmiştir. Katı atıkların heterojen olmasından dolayı her deneme 2 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir

Çizelge 5.3 Reaktörlerde kullanılan malzeme karışım oranları.

Reaktör	İçeriği	Hacimsel oran	Toplam Ağırlık (kg)
R1	Yonga/Biyolojik arıtma çamuru	2/1	70,8
R2	Yonga/Biyolojik arıtma çamuru	2/1	70
R3	Yonga/Biyolojik arıtma çamuru/prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	64,2
R4	Yonga/Biyolojik arıtma çamuru/prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	66,8
R5	Yonga /Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	61,6
R6	Yonga /Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	61,7
R7	Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru	2/1	56,8
R8	Sentetik malzeme /Biyolojik arıtma çamuru	2/1	56,3
R9	Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	46,3
R10	Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	48,1
R11	Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	40,4
R12	Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	40,6

Pilot reaktörlerdeki hava debileri, havalandırma borularındaki solenoid vanaları yardımıyla otomasyon sistemi ile kontrol edilmiştir. Proses süresince reaktörlere 15 dakikalık periyotlarla saatte yaklaşık $0,7\text{m}^3$ hava verilmiştir. Bu değer, reaktörlerde $10\text{-}17\text{ m}^3/\text{saat.ton}$ aralığına karşılık gelmekte olup tavsiye edilen aralıkta kalmıştır.

5.2 Aktarmalı ve Statik Yığın Çalışmaları

Pilot reaktörlerde gözlenen sıcaklık yükselmemesi probleminin, sistemde mikroorganizmalarca kolay parçalanabilir karbon eksikliği yanında kullanılan reaktörlerin hacminin ($\sim 120\text{ L}$) yeterince büyük olmamasından da kaynaklanabileceğinden hareketle ve aynı zamanda pratikte uygulanan çalışmaları daha iyi simüle edebilmek maksadıyla sonraki çalışmalar tam ölçekli yığınlarda gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında biyolojik arıtma çamurlarının tek başına, ayrıca ilave karbon kaynağı olarak prekot çamuru ve organik evsel

atıklarla birlikte havalı ortamda kompostlaştırılarak stabilizasyonu aktarmalı ve statik yığınlarda denenmiştir. Pilot reaktörlerde elde edilen sonuçlar yonga ve sentetik hacim artırıcı malzemelerin aynı neticeleri verdiğini gösterdiğinden, aktarmalı ve statik yığınlarda hacim artırıcı madde olarak sadece yonga kullanılmıştır. Çalışmada hem aktarmalı yığınlarda hem de statik yığınlarda birer adet hiçbir katkı ve hacim malzemesinin karıştırılmadığı evsel organik atık yığını sistemin çalışma verimini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Yığınlar temizlenmiş düz bir beton yüzey üzerine kurulmuş olup bütün yığınlar aynı istikamette hizalanmıştır. Dört adet statik yığın ve üç adet aktarmalı yığınla tam ölçekli olarak yapılan uygulamada kullanılan malzemelerin oranları ve oluşturulan yığınların boyutları Çizelge 5.4 te verilmiştir.

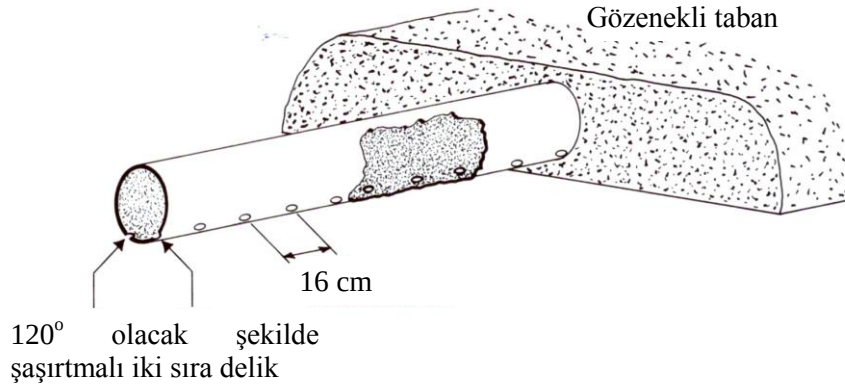
Çizelge 5.4 Aktarmalı ve statik yığınların içerikleri ve yığın boyutları.

	Yığın No	İçeriği	Hacimsel Oran	Yığın Boyutları (m) (Taban genişliği* yükseklik*uzunluk)	Toplam Hacim (m3)
Statik yığınlar	1	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	3,5*2*7,5	26
	2	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru	2 / 1	3,5*2*7,5	26
	3	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	3,5*2*7,5	26
	4	Organik evsel katı atık	1	3,5*2*7,5	26
Aktarmalı Yığınlar	5	Organik evsel katı atık	1	3*1,2*7,5	13,5
	6	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru	2 / 1	3*1,5*7,5	17
	7	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	3*1,5*7,5	17

Toplam yedi adet tam ölçekli yığından oluşan çalışmada statik yığınlar alttan vakum yapabilme ve hava verebilme yeteneğine sahip bir sistemle çalıştırılırken karıştırmalı yığınlar haftada bir olmak üzere iş makinesi ile karıştırılmıştır.

Statik yığınların arasındaki mesafe eksenden eksene 4,8m dir. Statik yığınlara hava, sağ ve solda iki adet yığın kalacak şekilde tam ortadan dağılım yapan borularla tek bir blowerdan verilmiştir. Hava boruları 10cm çapında olup yığın altlarına tekabül eden 6 m lik kısmı deliklidir. Hava delikleri boru üzerine alta bakan 120° lik açığı oluşturacak şekilde iki taraflı ve şaşırtmalı olarak 16cm de bir açılmıştır. Delik çapları 9mm olup havalandırma borusunun özellikleri Şekil 5.3 te verilmiştir.

Havanın atığın içine homojen olarak dağılmasını sağlamak için, yığınların tabanında, havalandırma sistemi borularının üzerinde yaklaşık 30 cm yükseklikte ve hava borusu merkezde kalacak şekilde 180 cm genişlikte kuru ağaç yongasından ızgara oluşturulmuştur. Havalandırma sistemindeki tüm borular ve dirsekler HDPE malzeme, flanşlar ve vanalar ise çelik malzeme olarak seçilmiştir.



Şekil 5.3 Havalandırma borusunun özellikleri.

Havalandırma ve vakum işlemi için tmm marka EJ 11-KBZ model 18,5 kW'lık blower kullanılmıştır. Vana sistemi ile ilk üç hafta vakum uygulanmış daha sonrasında ise yığınlara hava verilmiştir. Blower 15 dk çalıştırılıp 15 dk. bekletilmek suretiyle havalandırma işlemi yürütülmüştür. Oluşturulan statik yığınların havalandırma sistemi genel yerleşimi ve görünüşü Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4 Havalandırma sistemine ait resimler.



Şekil 5.6 Kondens suyu tutucusu resmi ve vakumla gelen suyun tahliyesi.



Şekil 5.7 Aktarmalı ve statik yığınların görünümü.

Vakum esnasında emilen hava inşa edilen bir biyofiltreye verilerek filtre edildikten sonra atmosfere bırakılmıştır. Biyofiltre; 1m çap ve 1m derinlikte alt kısımda delikli hava giriş yapısı ve hava giriş borusu olan, HDPE malzemeden mamul bir sistem olarak inşa edilmiştir. Biyofiltrede filtre malzemesi olarak ince yonga kullanılmıştır. Biyofiltre sistemine ait resimler Şekil 5.8 de verilmiştir.



Şekil 5.8 Biyofiltre.

5.3 Statik Yığın Çalışmaları

Bir önceki statik yığınlardan elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğini göstermek ve daha iyi bir karıştırma sağlamak amacıyla sadece statik yığın çalışmaları tekrarlanmıştır. Bu çalışmada; evsel atıksu biyolojik arıtma çamurlarının tek başına, ayrıca ilave karbon kaynağı olarak prekot çamuru ve organik evsel atıklarla birlikte havalı ortamda kompostlaştırılarak stabilizasyonu tam boyutlu olarak denenmiştir. Ayrıca çalışmada, statik yığın kompostlaştırma süreci kinetik katsayıları hesaplanmış ve süreçte rol alan mikrobiyal türler belirlenmiştir.

Yığınlarda, ilave hacim arttırıcı madde olarak yonga kullanılmıştır. Dört adet tam boyutlu havalandırılmalı statik yığında kullanılan malzemelerin oranları ve oluşturulan yığınların boyutları Çizelge 5.5 te verilmiştir.

Çizelge 5.5 Statik yığınların içerikleri ve boyutları.

Yığın No	Statik yığınlar	Hacimsel Oran	Yığın Boyutları (m) (Taban genişliği* yükseklik*uzunluk)	Toplam Hacim (m ³)
1	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	3,5*2*7,5	26
2	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru	2 / 1	3,5*2*7,5	26
3	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	3,5*2*7,5	26
4	Organik evsel katı atık	1	3,5*2*7,5	26

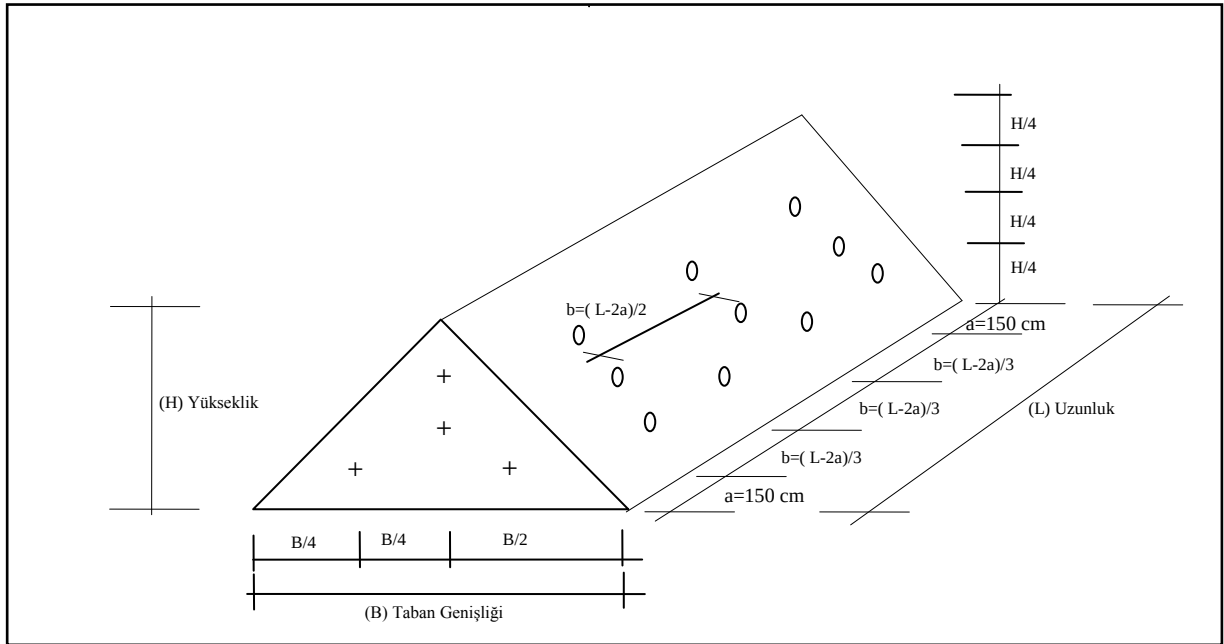
Bu deneme öncesinde yürütölmüş olan aktarmalı ve statik yığın çalışmasında statik yığınlar için kullanılan havalandırma sistemi altyapısı bu denemede de aynı şekilde kullanılmış olup bu altyapıya ait detay bilgi Bölüm 5.2 de verilmiştir. Oluşturulan yığınlara ait resimler Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9 Statik yığınların hazırlanışı ve yığınlara ait resimler.

Yığınlar oluşturulurken, özellikle biyolojik çamurla diğer malzemelerin homojen bir karışımını temin etmek amacıyla belirlenen oranlardaki malzemelerin, bir lastikli loder iş makinesi yardımıyla ön karışımları yapılmıştır. Bu ön karışımnda çamur topakları meydana gelmiştir. Kompostlaştırma prosesinde anaerobik bölgelerin oluşmaması ve topaklaşmış kısımların yığın karışımıyla homojen hale getirilmesi amacıyla ön karışım malzemeleri Doppstad marka kaba odun parçalayıcısına atılarak tam karışım elde edilmiştir. Elde edilen tam karışım malzeme lastikli loder iş makinesi yardımıyla yığın alanına nakledilerek yığınlar oluşturulmuştur.

Sıcaklık ölçümleri, her bir yığın için belirlenen 14 ayrı noktadan her gün Fluke marka çubuk tip sıcaklık ölçerle gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde, yığınların yüksekliği (H) ve taban genişliği (B) dikkate alınarak ölçüm noktaları belirlenmiştir. Sıcaklık ölçüm noktalarından sekizi, yığın tabanından H/4 (50 cm) yükseklikte ve yığın boyunca yığının iki yüzüne eşit aralıklarla dağıtılan ve sıcaklık ölçerin yığın içine B/4 (90 cm) daldırıldığı noktalardan oluşturulmuştur. Geriye kalan altı adet noktanın üçü, yığın üst seviyesinin H/4 (50 cm) ve diğer üçü H/2 (100 cm) aşağısından olacak şekilde; yığın boyunca eşit aralıklarla dağıtılan ve sıcaklık ölçerin yığın içine genişlik orta mesafeye ulaşılacak şekilde daldırılan noktalardan oluşturulmuştur. Yığınların baş ve sonlarında uç kısma 1,5 m mesafe bırakılarak ölçüm yapılmıştır. Yapılan bütün okumaların ortalamasından elde edilen değer, yığın sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Yığınlarda sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı yerlerin şematik gösterimi Şekil 5.10 da verilmiştir.



(O: Sıcaklık ölçüm noktaları, +: sıcaklık ölçerin daldırıldığı derinlik)

Şekil 5.10 Yığınlerde sıcaklık ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi.

5.4 Organik Madde Kaybı Üzerinden Kompost Kinetiği

Havalandırılmalı pilot reaktör ve statik yığın (üçüncü deneme) çalışmaları için yapılan kompost kinetiği hesaplamalarında, kompostlaştırma sürecinde her karışım için biyoayrışabilirlik aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmıştır (Haug, 1993; Yanez vd., 2009).

$$K_b = \frac{[(OM_i - OM_s)100]}{[OM_i(100 - OM_s)]} \quad (6.1)$$

Burada,

K_b : Biyoayrışabilirlik, (%)

OM_i : Başlangıçtaki organik madde yüzdesi, (%)

OM_s : Kompostlaştırma sürecinin sonundaki organik madde içeriği, (%)

Organik madde veya uçucu katı madde ayrışma hızını ifade eden kompostlaştırma kinetiği, Whang ve Meenaghan (1980) tarafından evsel arıtma çamurlarının kompostlaştırılması için elde edilen aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmiştir. Eşitlikteki K_1 ve K_2 değeri deneysel verilerden elde edilebilir. Bu eşitlik evsel arıtma çamuru kompostlaştırma sürecinde farklı karışımlar için Yanez vd. (2009) tarafından kullanılarak kompost kinetiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada da aynı eşitlik kullanılarak farklı karışımlarla kompostlaştırma süreç kinetiğinin değişimi belirlenmiştir.

$$\frac{1}{R} = \frac{K_1}{K_2} \frac{1}{C} + \frac{1}{K_2} \quad (6.2)$$

Burada,

C : Karbon muhtevası, ($g_{\text{karbon}}/g_{\text{kül}}$)

R : Günlük karbon kaybı, ($g_{\text{karbon}}/g_{\text{kül-gün}}$) (C ye karşı t (zaman) grafiğinin eğiminden elde edilmektedir)

K_1 ($g_{\text{karbon}}/g_{\text{kül}}$) ve K_2 ($g_{\text{karbon}}/g_{\text{kül-gün}}$) kinetik katsayılar

5.5 Etkin Mikrobiyal Türlerin Tespiti

Kompostlaştırma esnasında, organik maddeyi substrat olarak kullanan mikroorganizmalar kompostlaştırma prosesinin performansını ve gelişimini yansıtmaktadırlar. Organizmaların kompostlaştırma esnasında substratı metabolik yollarla nihai ürünlere dönüştürmesi ile fiziksel ve kimyasal parametrelerde önemli değişiklikler olmakta, buna bağlı olarak kompostlaştırma prosesinde rol alan mikrobiyal türlerde de değişimler meydana gelmektedir.

Kompostlaştırma prosesinde mikrobiyal türlerin belirlenmesi, geçmiş yıllarda bakteri ve mantarların izolasyonu, tanımlanması veya sayım işlemleri ile gerçekleştirilmekteydi. Son yıllarda, polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) ve 16S rDNA temelli moleküler tekniklerle kompostlaştırma prosesinde mikrobiyal türlerin tayini ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Ishii et al., 2000).

16S rDNA ve PCR temelli teknikler kompostlaştırma prosesinde klasik tekniklerle tespit edilemeyen türlerin çeşitliliğini belirlemede ön plana çıkmaktadır (Dees and Ghiorse, 2001).

Son yıllarda, profillemeye teknikleri ile kombine edilen 16S rDNA temelli yaklaşımlara olan ilgi giderek artmaktadır. Kompostlaştırma prosesindeki tür tayininde, Denature Gradyan Jel Elektroforez tekniği (DGGE) profillemeye tekniği olarak son yıllarda en çok kullanılan metotlardandır (Ishii et al., 2000; Ishii and Takii, 2003).

Mikroorganizmalar, çoğunlukla hücre yapısı ve fonksiyonlarına göre sınıflandırılmaktadır. Prokaryotik grup veya bakteriler, katı atıkların organik kısmının biyolojik olarak ayrışmasında önemlidir. Organik atıkların biyolojik olarak ayrışmasında görev yapan ökaryot organizmalar mantarlar ve aktinomisetlerdir. Kompostlaştırma işlemi, nemli ortamda ve organik atıkları havalandırmak suretiyle kendiliğinden çoğalan mikroorganizmalar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Başlangıçta çoğunlukla bakteri olan bu organizmaların çoğalması sırasında, ısı, CO₂ ve su buharı açığa çıkar. İlk aşamada, mezofilik bakterilerle birlikte aktinomisetler, mantarlar ve mayalar; yağları, proteinleri ve karbonhidratları ayrıştırırlar. Sıcaklık 30 °C'ye erişinceye kadar küf mantarları, bakteriler, protozoolar ve nematodlar kompostlaştırma işleminde etkin rol oynarlar. Sıcaklık 30-40 °C ye çıktığında aktinomisetler baskın hale gelmeye başlar ve topraksı bir koku oluştururlar. Aktinomisetler humuslaştırıcı organizmalar olarak da bilinmektedirler. Bunun yanında, bu türler antibiyotik etki üreterek patojenlerin ölmesini de sağlamaktadır. Sıcaklık 40-50 °C'ye çıktığında başlangıçtaki türler ölür ve 70°C ye kadar faaliyet gösterebilen termofilik bakteriler gelişmeye başlar. Bu aşamada gelişen bakteri ve aktinomisetler, zor ayrışabilen organiklerin ayrışmasında görev yapmaktadırlar. Sıcaklık artışıyla birlikte patojen mikroorganizmalar da ölür. Ortamdaki besi maddesi tükendiğinde ısı düşmeye başlar ve kompostun soğuması gerçekleşir. Soğuyan komposta son özelliğini veren genellikle mantar ve aktinomisetlerden oluşan türlerdir. Görüldüğü gibi sırası ile gerçekleşen kompost prosesinde tüm kademeler farklı mikrobiyal türler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu bakımdan kompostlaştırma prosesinin performansı ve gelişimi mikrobiyal türlerle yakından ilişkilidir (Demir ve Özkaya, 2009).

5.5.1 Mikrobiyal Tür Analizleri

Mikrobiyal tür tayini; nükleik asit ekstraksiyonu, PCR (Polimeraz Zincir Reaksiyonu), DGGE (Denatüre gradyan Jel Elektroforezi) ve Nükleik Asit Dizisinin belirlenmesi kademelerinden oluşmaktadır. Alınan numuneler, moleküler tekniklerde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Numunelerden ilk olarak nükleik asitler ekstre edilmiş, ekstre edilen DNA'lar, -20°C'de muhafaza edilmiştir. Ekstre edilen DNA karışımlarının 16S rRNA genleri, PCR yöntemi kullanılmak sureti ile ısı döngüleme (Thermal Cycler) aleti ile çoğaltılmıştır. Bu işlem sonrası metanojenik tür çeşitliliği, "denaturing gradient gel electrophoresis" (DGGE) ve DNA dizi analiziyle tespit edilmiştir. Moleküler çalışmalarda PCR (Mycycler Thermal Cycler System), Elektroforez Cihazı, Jel Görüntüleme Sistemi (ORTE) ve Genetik Analiz Sistemi (Beckman Coulter CEQ 8000) kullanılmıştır.

5.5.2 Nükleik Asit Ekstraksiyonu

DNA izolasyonunda, numuneler 10 dakika 14000 devir/dakika'da santrifüj edilerek konsantre hale getirildikten sonra zirconia/silica boncuklar kullanılarak mekanik olarak dağıtılmıştır. FASTPREP-24 cihazı ile gerçekleştirilen mekanik parçalamadan sonra ortaya çıkan DNA, FastDNA SPIN Kit (Q-BIOgene) prosedürüne uygun olarak saflaştırılmıştır.

5.5.3 Polimeraz Zincir Reaksiyonu

Klasik polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) amplifikasyonu ile çoğaltılan 16S rRNA genleri DGGE analizlerinde kullanılmıştır. 16S rRNA genleri için çeşitli primerler kullanılarak Biorad Termocycler ile amplifikasyon gerçekleştirilmiştir.

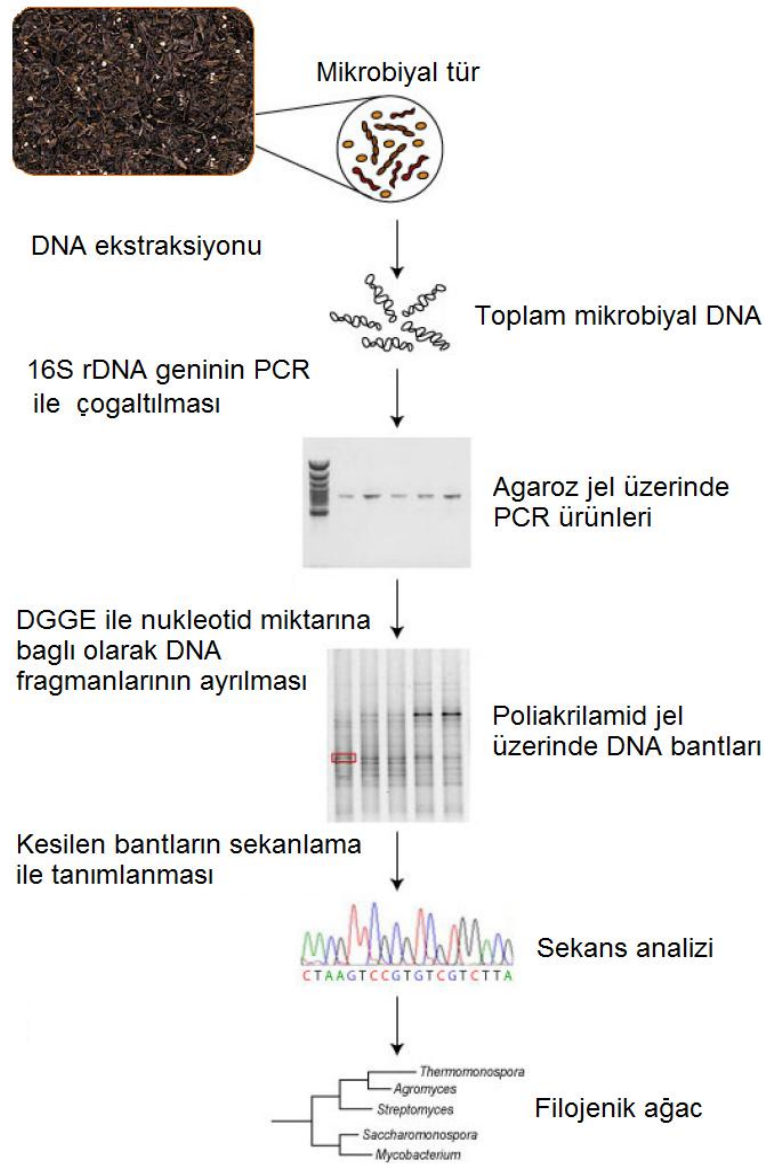
5.5.4 Denaturing Gradient Gel Electrophoresis

Dizi analizi öncesi klonların tür farklılıkları, denatüre gradyan jel elektroforezi (DGGE) tekniği ile tespit edilmiştir. Farklı türler dizi analizi yöntemi ile doğrulanmıştır. DGGE, PCR ile çoğaltılmış DNA örneklerindeki tek baz değişimlerinin ve polimorfizmin belirlenmesinde etkili bir genetik analiz yöntemidir. DGGE deneyinde denatüre madde (formamit ve üre karışımı), poliakrilamid jellerdeki yarı erimiş, çift-sarmallı DNA moleküllerinin azalmış elektroforetik hareketine bağlıdır.

5.5.5 DNA dizi analizi

Türlerin birbirinden ayırt edilmesi için, klasik PCR ile 16S rRNA genlerinin çoğaltılmasından sonra, DGGE analiziyle türler birbirinden ayırt edilmiştir. Dizi analizi için seçilen klonların miktarı PCR ve DGGE analizleri sonunda belirlenmiştir. PCR ya da DGGE jellerinde

görüntülenen bandlar, uygun saflaştırma kitleri kullanılarak saflaştırılmıştır. Bu ürünler daha sonra “dye terminator cycle sequencing” reaksiyonuna sokularak floresan işaretli fragmanların amplifikasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ürün saflaştırılmış ve formamid çözeltisi içinde süspanse edilmiştir. Dizi analizleri için Beckman Coulter marka CEQ 8000 model Genetik Analiz Sistemi kullanılmıştır. Analiz verileri, A-G-C-T dizin dosyaları biçiminde kopyalanarak, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/> internet sitesinde BLAST programında değerlendirmeye alınarak değerlendirilmiştir. Moleküler analiz yöntemlerinin uygulama akış şeması Şekil 5.11 de verilmiştir.



Şekil 5.11 Moleküler analiz yöntemlerinin uygulama akış şeması.

Üçüncü deneme olan statik yığın çalışmalarında, biyokatıların biyolojik stabilizasyonunda rol alan mikrobiyal türlerin PCR (polimeraz Zincir Reaksiyonu)-DGGE (Denature Gradyan Jel

Elektroforezi) temelli moleküler tekniklerle belirlenmesi amacıyla yığınlardan farklı sıcaklıklarda alınan numunelerde mikrobiyal türlerin belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen DGGE profilinde her bant bir mikrobiyal türü temsil etmektedir. Bazen bazı bantların uzantısı da aynı türü temsil edebilir. Bu durumu netleştirebilmek ve bandların mikrobiyal tür tanımlamalarını yapabilmek için 16S rRNA genlerinin sekans analizleri gerçekleştirilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Reaktör ve yığın kompostlaştırma sürecinden elde edilen deney sonuçları, (1) başlangıç hammadde ve karışımların özellikleri (2) kompostlaştırma sürecinde temel parametrelerin (sıcaklık, pH, iletkenlik, su muhtevası, amonyak, organik madde ve KOİ) değişimleri ve (3) nihai ürünün özellikleri olmak üzere üç başlıkta sunulmuştur. İlave olarak, gerek reaktör ve gerekse yığın kompostlaştırma sürecinde karbon kaybı üzerinden kompost kinetiği ve biyoayrışabilirlik incelenmiş ve sonuçları ilgili bölümlerde verilmiştir. Statik yığınlarda yürütülen tür tayini çalışması ise ilgili bölümde anlatılmıştır.

6.1 Pilot Reaktör Kompostlaştırma Çalışmaları

6.1.1 Reaktörlerdeki Başlangıç Hammadde ve Karışımların Özellikleri

Reaktörlerde kullanılan malzemelere ait analizler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Pilot reaktörde kullanılan malzemelere ait analiz sonuçları.

Parametre	Biyolojik arıtma çamuru	Prekot	Organik atık	Yonga
pH	7,8	3,4	6,3	7,9
İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1670	2650	3960	850
Su muhtevası (%)	80	55	54	30
Organik madde (%)	55	67	69	91
C (%)	30	35	32	40
N (%)	4,5	1,9	1,4	0,4
C / N	6,7	18,4	22,9	100
NH ₃ -N (mg/l)	170	140	55	15
KOİ (mg/l)	4550	31500	1760	1870
Cd (mg/kg)	1,1	0,2	0,29	0,14
Cr (mg/kg)	145	54,5	17,72	60,5
Cu (mg/kg)	190	30	43,79	30
Pb (mg/kg)	30	4,1	32,68	6,2
Ni (mg/kg)	60	35	15,13	160
Hg (mg/kg)	0,67	0,32	0,64	0,02
Zn (mg/kg)	510	85	125,95	60
P (g/kg)	21	3,6	2,63	8,5
Yoğunluk (kg/L)	0,7	0,49	0,67	0,3

Reaktör karışımlarının başlangıç karakterizasyonu, iki tekerrürlü reaktörlerin herbirinden alınan numunelerin analiz edilmesiyle elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2 de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Reaktörlerin başlangıç atık karakterizasyonları.

Parametre	Y/BÇ R1-R2	Y/BÇ/P R3-R4	Y/BÇ/OA R5-R6	SM/BÇ R7-R8	SM/BÇ/P R9-R10	SM/BÇ/OA R11-R12
pH	7,6	6,3	7,8	7,6	6,7	7,5
İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1670	1953	2165	1670	1984	2356
Su muhtevası (%)	75,5	69,2	72,8	75,5	73,1	72,8
Organik madde (%)	55	60,4	58,1	55	61,8	58,1
C (%)	30	33	30	30	34	30,5
N (%)	4,5	3,3	2,6	4,5	3,2	2,8
C/N	6,7	10	11,5	6,7	10,6	10,9
$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/l)	170	146,5	94,1	170	136,4	142,5
KOI (mg/l)	1500	2500	1100	1500	2250	1900
Cd (mg/kg)	1,1	1,3	2,4	1,1	1,7	2,4
Cr (mg/kg)	145	115	155	145	130	155
Cu (mg/kg)	190	110	200	190	165	200
Ni (mg/kg)	60	55	70	60	60	70
Pb (mg/kg)	30	18,5	39	30	25,5	39
Zn (mg/kg)	510	345	550	510	450	550
Yoğunluk (kg/L)	0,58	0,55	0,51	0,47	0,39	0,34

(Y: Yonga; BÇ: Biyolojik çamur; P: Prekot; OA: Organik atık; SM: Sentetik malzeme; R:Reaktör)

Başlangıçta tavsiye edilen pH aralığı; 5,5-9 olup reaktörlerde başlangıçta pH 6,3-7,6 aralığında değişmektedir. R3-R4 ile R9-R10 un pH değerleri prekotun etkisiyle diğer reaktörlere göre kısmen düşüktür.

Mikrobiyal parçalanma için gerekli nem oranı, başlangıçta %50-70 aralığında olması tavsiye edilmektedir (WEF, 1995a). Reaktörlerdeki su muhtevaları %69-75 aralığında değişmekte olup bu değerler başlangıç için kısmen yüksektir.

Reaktörlerde organik madde içeriği, başlangıçta %55-62, C/N oranları ise çamur reaktörü hariç 10-11,5 aralığında değişmektedir. Çamur reaktörünün C/N değeri ise 6,7 dir. Başlangıç C/N değeri analizlerinde hacim artırıcı malzemeler (yonga ve sentetik malzeme) numunelerden ayıklanmıştır. Dolayısıyla özellikle yonga karışımli reaktörlerde karışımın C/N değeri daha yüksek olmasına rağmen analiz değerleri düşük çıkmaktadır. Yoğunluk değerleri, reaktörlerin dolu ağırlığının faydalı hacmine oranından hesaplanmıştır.

6.1.2 Reaktör Kompostlaştırma Sürecinde Temel Parametrelerin Değişimleri

Reaktör kompostlaştırma sürecinde sıcaklık, pH, iltkenlik, su muhtevası, amonyak, organik madde ve KOI parametreleri izlenmiştir. Altı farklı karışımla beslenen reaktörler iki paralelli olarak işletilmiş ve 7 haftalık izleme sonuçları aşağıda verilmiştir.

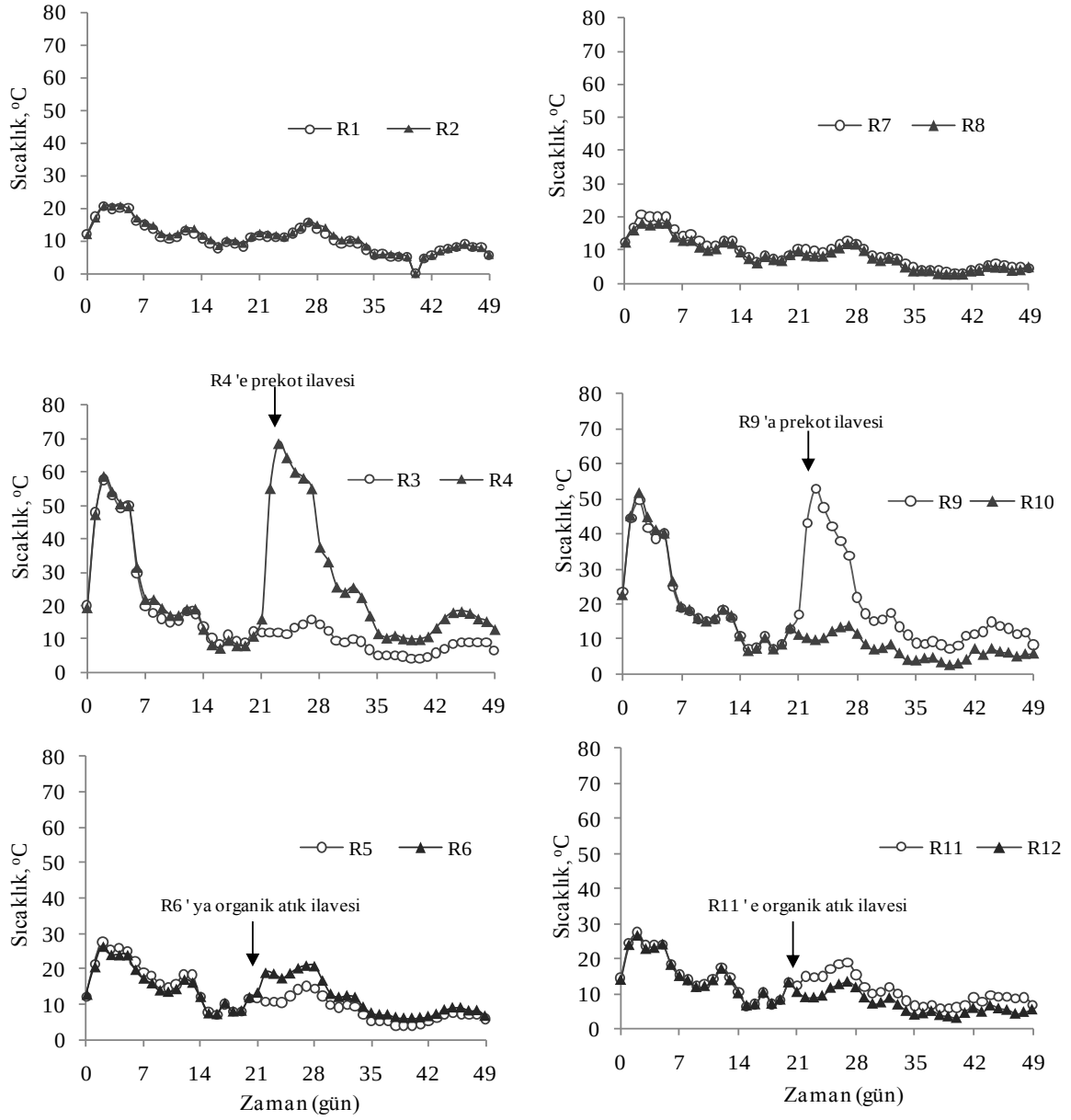
6.1.2.1 Sıcaklık

Reaktörlerden on-line olarak kayıt alınan sıcaklık değerleri, her karışım için tekerrürlü reaktörler birlikte olacak şekilde Şekil 6.1 de verilmiştir. Tekerrürlü reaktörler kendi içlerinde uyum göstermektedir. Çamur/yonga reaktörleri (R1 ve R2) ile çamur/sentetik malzeme reaktörleri (R7 ve R8)'nde beklenen sıcaklık yükselmesi gözlenmemiştir.

Organik evsel katı atık/çamur karışımı içeren yonga (R5 ve R6) ile sentetik malzemeli (R11 ve R12) reaktörlerde sadece çamur reaktörlerine nazaran kısmi sıcaklık yükselmesi ($\sim 30^\circ\text{C}$) gerçekleşmiştir. Prekot /çamur karışımı içeren yonga (R3 ve R4) ile sentetik malzemeli (R9 ve R10) reaktörlerinde ise başlangıçta beklenen sıcaklık yükselmesi ($\sim 50-60^\circ\text{C}$) gözlenmiştir. Prekot içeren reaktörlerde, başlangıçta elde edilen yüksek sıcaklıklar, daha sonra azalarak $\sim 10-20^\circ\text{C}$ seviyelerinde kalmıştır.

Çamur ile çamur/organik evsel katı atık içeren reaktörlerde de benzer şekilde sıcaklıklar $\sim 10-20^\circ\text{C}$ değerlerinde seyrettiğinden, reaktörlerde mikroorganizmalar için gerekli kolay parçalanabilir karbonun azaldığı kanaatine varılmıştır. Bu nedenle, çalışmanın 3. haftasında yonga/prekot/çamur karışımı reaktörüne (R3) ve sentetik malzeme/prekot/çamur karışımı reaktörüne (R9) tekrar bir miktar prekot ilavesi yapılmıştır. Benzer şekilde, aynı tarihte yonga /organik evsel katı atık/çamur karışımı reaktörüne (R6) ve sentetik malzeme/organik evsel katı atık/çamur karışımı reaktörüne (R11) tekrar bir miktar organik evsel katı atık ilavesi yapılmıştır.

Organik evsel katı atık ilavesi sonucunda sıcaklıklar $\sim 10^\circ\text{C}$ seviyesinden, 20°C değerine yükselirken, prekot ilave edilen reaktörlerde sıcaklıklar $\sim 60-70^\circ\text{C}$ seviyesine çıkmıştır. Kompostlaştırma sürecindeki sıcaklık-zaman profilleri, atığın biyolojik olarak ayrışabilirliğinin açık göstergesidir. Biyolojik ayrışabilirliği düşük (yavaş yada zor ayrışan) organik atıklarda sıcaklığın 40°C üzerine çıkması zordur (Chiumenti vd., 2005). Reaktörelere elde edilen sıcaklık profilleri, biyolojik ayrışabilirliği düşük olan çamur karışımlarının kompostlaştırılmasındaki sıcaklık değişimleri Şekil 4.5 ile paralellik göstermekte olup bu durum çalışmada kullanılan arıtma çamurlarının yeterli miktarda kolay parçalanabilir karbon içermediğini göstermektedir.

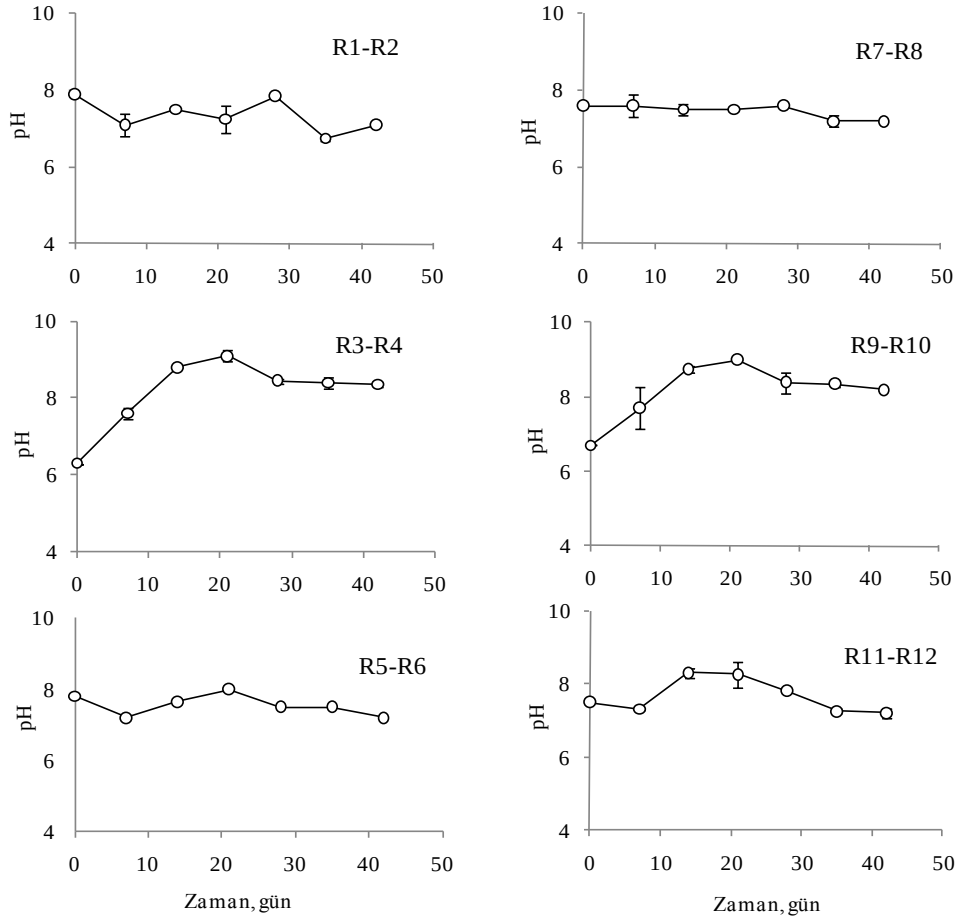


(R: Reaktör, R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.1 Reaktörlerde sıcaklığın zamanla değişimi.

6.1.2.2 pH

pH kontrolü, mikrobiyal ortamın ve kompostlaştırma sürecinin (atık stabilizasyonunun) değerlendirilmesinde önemli parametrelerdendir. pH profili, kompostlaştırma prosesinin gidişatı ve mikrobiyal faaliyet hakkında bilgi vermektedir. Kompostlaştırma sürecinde, pH' daki değişimlerin, paralel reaktörlere ait ortalama değerleri Şekil 6.2 de verilmiştir.



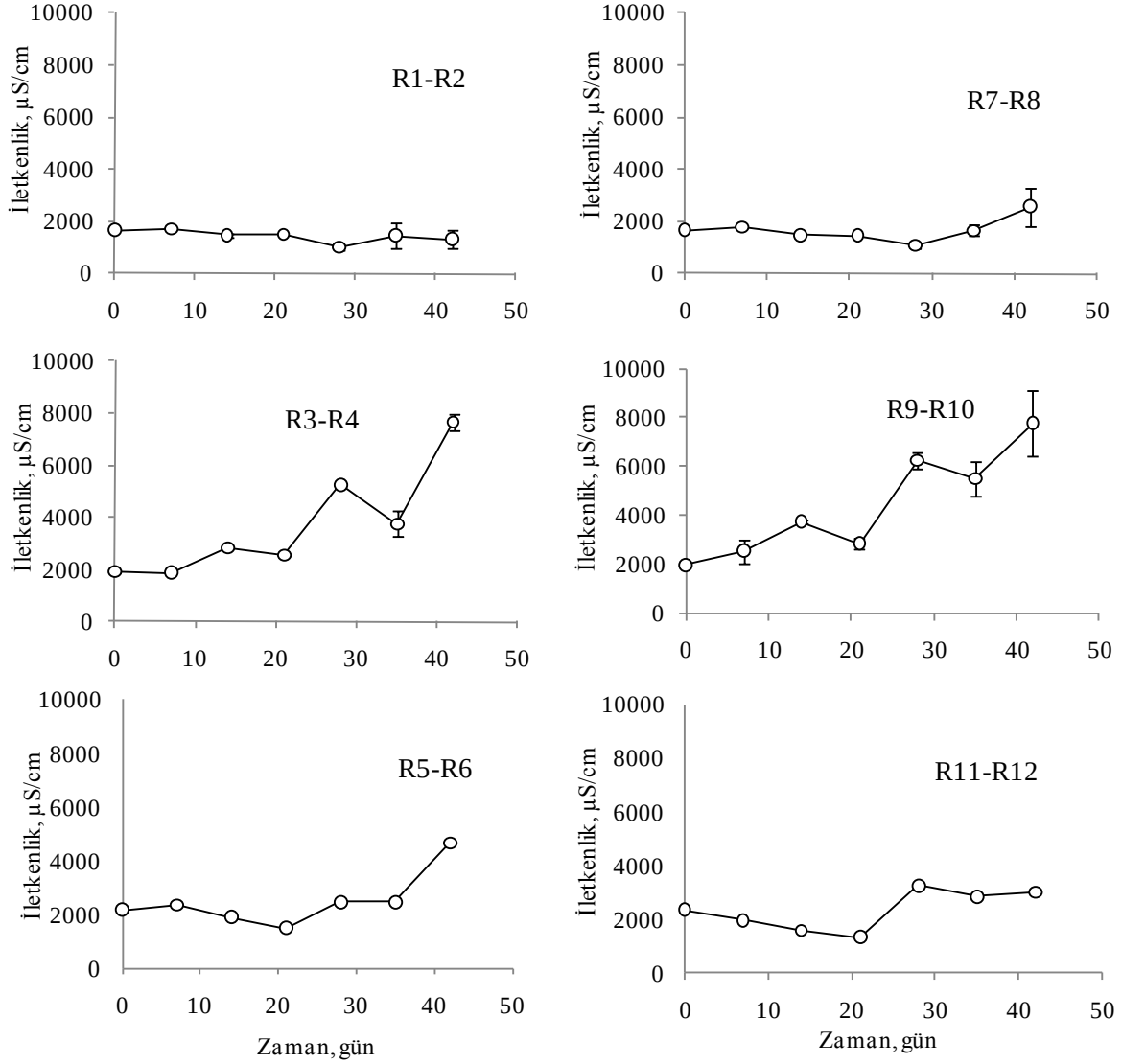
(R: Reaktör; R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.2 Reaktörlerde pH'nın zamanla değişimi.

Başlangıç karışımlarında sadece çamur karışımli reaktörlerde pH 7,5-8 aralığında kalmış olup, organik atık ilavesi pH'yı önemli ölçüde değiştirmemiştir. Ancak prekot ilavesi prekotun pH'sının 3,5 civarında olması sebebiyle prekot ilaveli reaktörlerde pH'nın 6,5 seviyesine düşmesine neden olmuştur. Ancak ilerleyen haftalarda prekot katkılı reaktörlerde pH artarak yaklaşık pH 8 değerlerine yükselmiştir.

6.1.2.3 İletkenlik

Elektriksel iletkenlik (EI), çözülmüş tuz konsantrasyonunun göstergesi olmasından dolayı önemli bir parametredir. İletkenlik, çözülmüş iyonların miktarı ve türü ile değişmektedir. İletkenlik, kompostun toprak iyileştiricisi olarak kullanılmasında, fitotoksosite potansiyelini değerlendirmek için özel önem taşımaktadır. Reaktör kompostlaştırmada iletkenliğin zamanla değişiminin paralel reaktörlere ait ortalama değerleri Şekil 6.3' te verilmiştir.



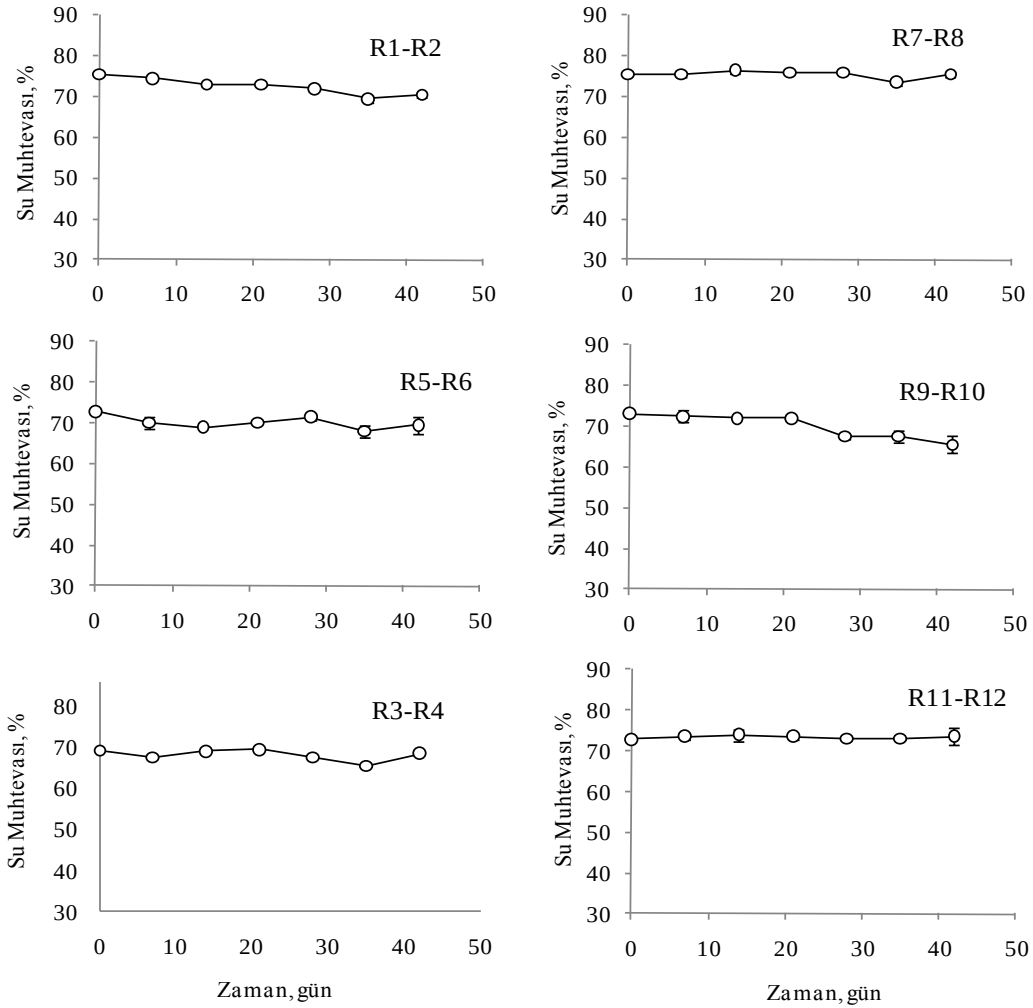
(R: Reaktör; R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.3 Reaktörlerde iletkenliğin zamanla değişimi.

Bütün reaktörlerde, iletkenlik zamanla artarak, çamur reaktörlerinde 2000 $\mu\text{S/cm}$, organik evsel katı atık/çamur karışımı reaktörlerinde 4000 $\mu\text{S/cm}$ ve prekot /çamur karışımı reaktörlerinde 6000 $\mu\text{S/cm}$ seviyelerine yükselmiştir. Tüm karışımlar için paralel işletilen toplam 12 adet reaktörde iletkenlik değerleri kompostlaştırma sürecinde artma eğilimindedir. Şekildeki standart sapmalar aynı şartlarda işletilen reaktörlerde birbirine oldukça yakın sonuçların elde edildiğini göstermektedir. Prekot katkılı reaktörler olan R4 ve R9 a üçüncü haftada yapılan prekot ilavesi reaktörlerde iletkenliği yükseltmiştir.

6.1.2.4 Su Muhtevası

Su muhtevası, kompostlaştırma prosesinde mikrobiyal aktivitenin devamı açısından önemli bir parametredir. Kompostlaştırma için optimum su muhtevası % 50-70 aralığında olup, su muhtevasının düşük olması mikrobiyal aktivitenin yavaşlamasına neden olurken, yüksek olması ise havanın etkin bir şekilde atık içerisinde dağılmasını engellemektedir. Su muhtevası değişiminin paralel reaktörlere ait ortalama değerleri Şekil 6.4 te verilmiştir.



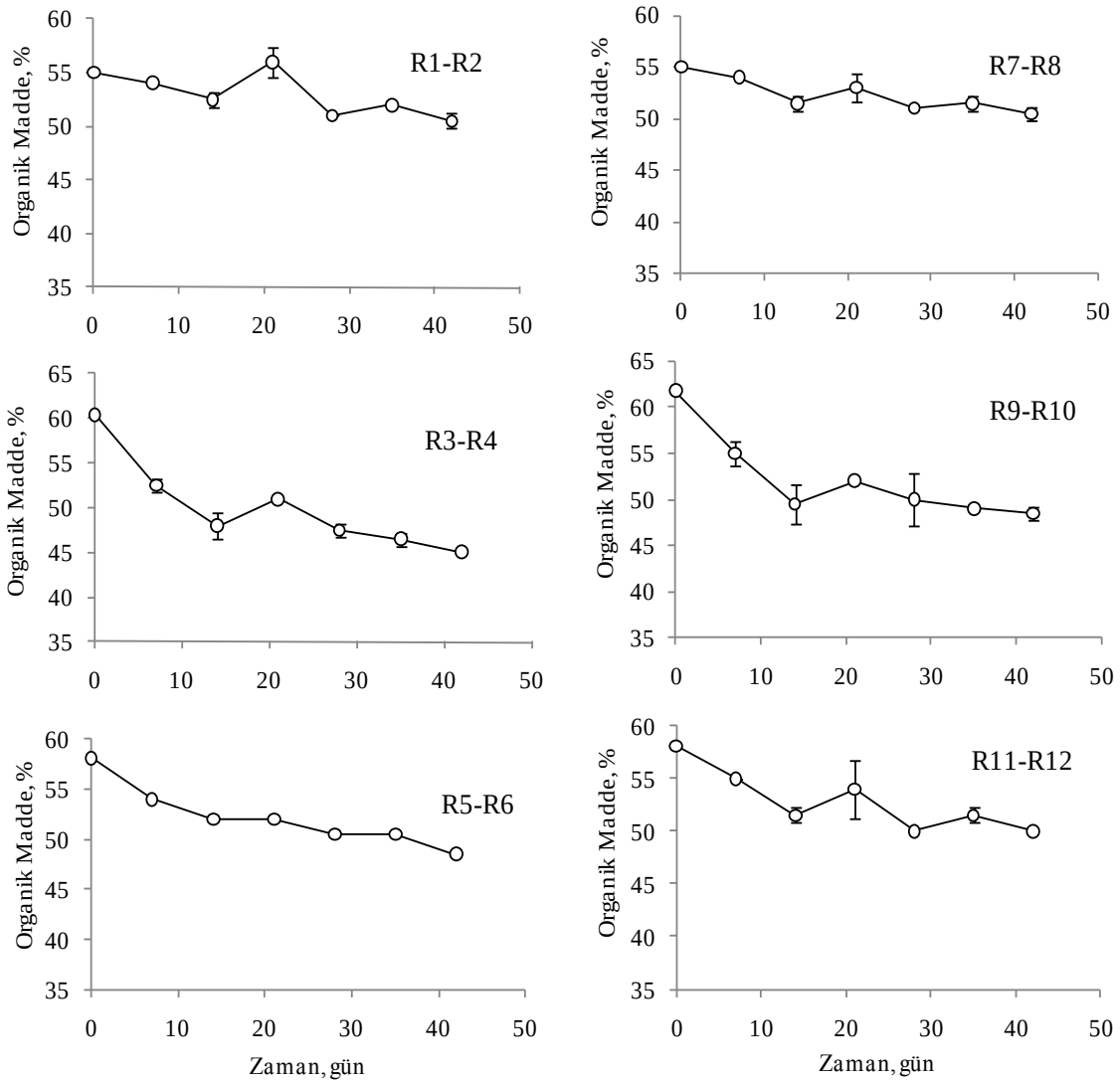
(R: Reaktör; R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.4 Reaktörlerde su muhtevasının zamanla değişimi.

Su muhtevaları, tüm reaktörlerde mikroorganizmaların maksimum büyüme gösterdiği %50-70 aralığının kısmen üzerinde seyretmiştir. Su muhtevasının zamanla azalarak nihai kompostta %40 mertebelerine gerilemesi gerekirken reaktörlerde bu gerçekleşmemiştir. Bu durum biyolojik ayrışmanın yeterince temin edilemediğini ifade etmektedir.

6.1.2.5 Organik Madde

Organik madde miktarı, bütün reaktörlerde zamanla azalmıştır (Şekil 6.5). Biyolojik aktivite sonucu organik maddedeki azalma en fazla prekot ilaveli reaktörlerde, daha sonra organik atık ilaveli reaktörlerde ve en düşük olarak da katkısız çamur reaktörlerinde gerçekleşmiştir. Bu durum biyolojik çamurların kompostlaştırılmasında, mikrobiyal aktivite için sisteme kolay parçalanabilir karbon temininde, ilave karbon kaynağı olarak prekotun etkin olduğunu göstermektedir. Prekottan daha düşük olmakla beraber, organik atık da sisteme kolay parçalanabilir karbon temin etmiştir.

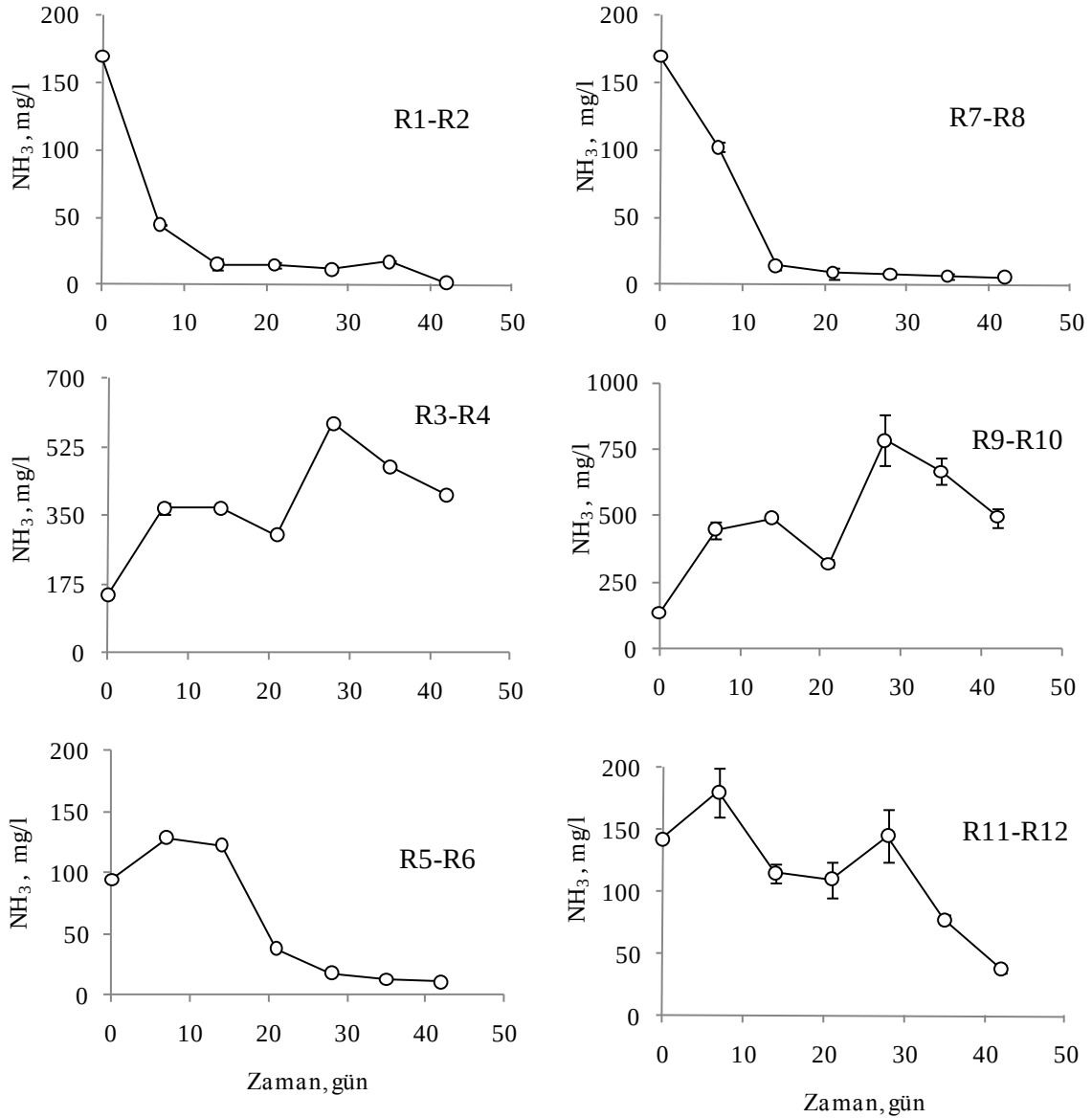


(R:Reaktör; R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.5 Reaktörlerde organik maddenin zamanla değişimi.

6.1.2.6 Amonyak

Amonyak, kompostlaştırma sırasında atmosfere yayılan azotun en genel formu olup, protein, üre ve diğer azot içeren organik maddelerin ayrışması sonucu açığa çıkmaktadır. Amonyanın zamanla değişiminin paralel reaktörlere ait ortalama değerleri Şekil 6.6 da verilmiştir.



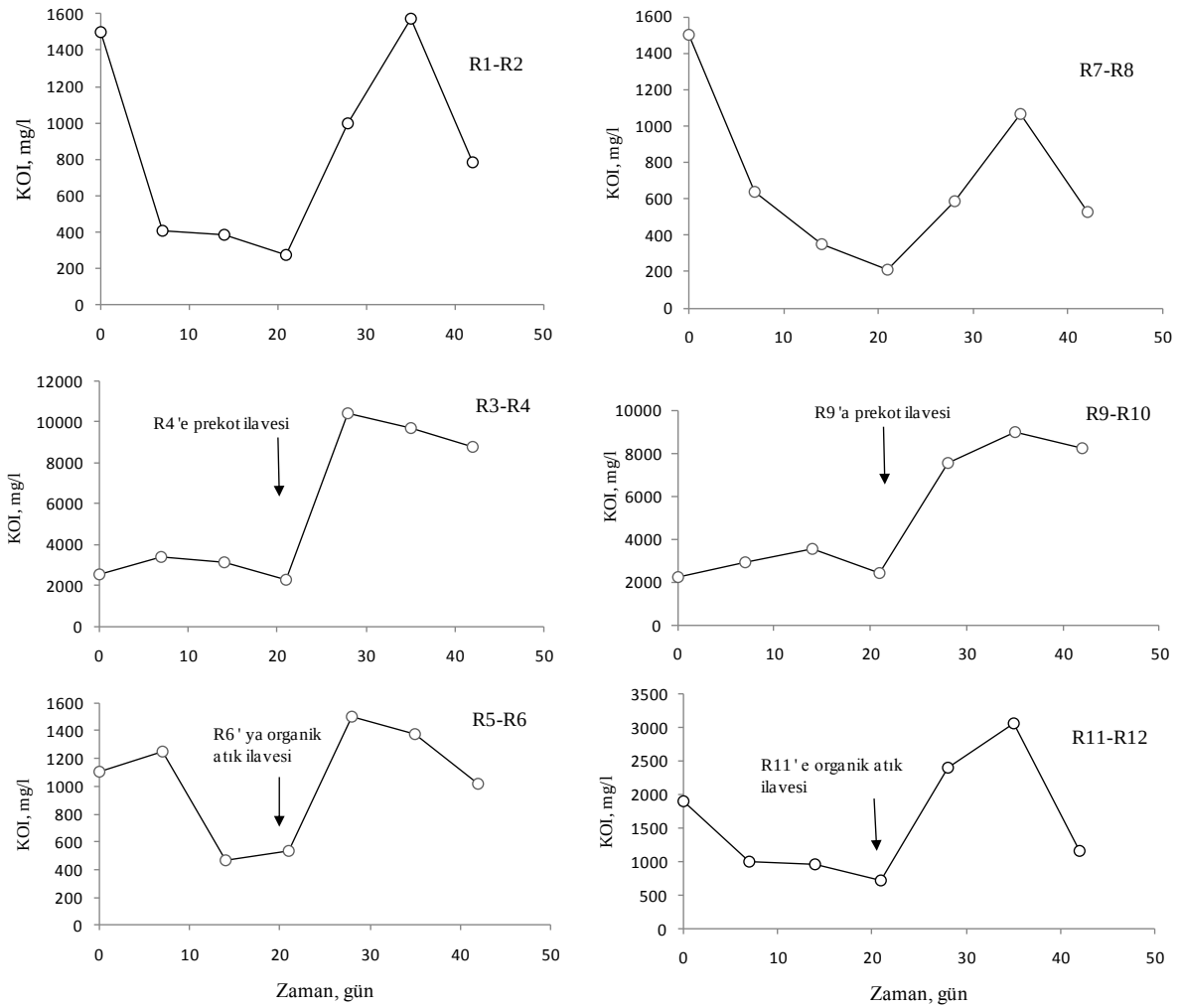
(R: Reaktör; R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.6 Reaktörlerde amonyağın zamanla değişimi.

R1-R2 ve R7-R8 hariç bütün reaktörlerde amonyak ilk haftada artmış, daha sonra zamanla azalmıştır. En yüksek amonyak seviyeleri (~ 500-750 mg/l) prekot/çamur karışımı reaktörlerinde gözlenmiştir.

6.1.2.7 Çözünmüş KOİ

KOİ parametresi, su ile ekstrakte edilebilen mevcut organik maddenin bir göstergesi olup kompostlaştırma prosesi boyunca değişiminin incelenmesi katı atığın ayrışma derecesinin bir göstergesidir. Prekot/çamur karışımı reaktörlerde KOİ değerleri, prekotun organik yapısından dolayı ilave edilen miktarla orantılı olarak artmıştır (Şekil 6.7). Bununla birlikte, sadece çamur içeren ve organik evsel katı atık/çamur karışımı reaktörlerinde başlangıç KOİ değerleri oldukça düşüktür.



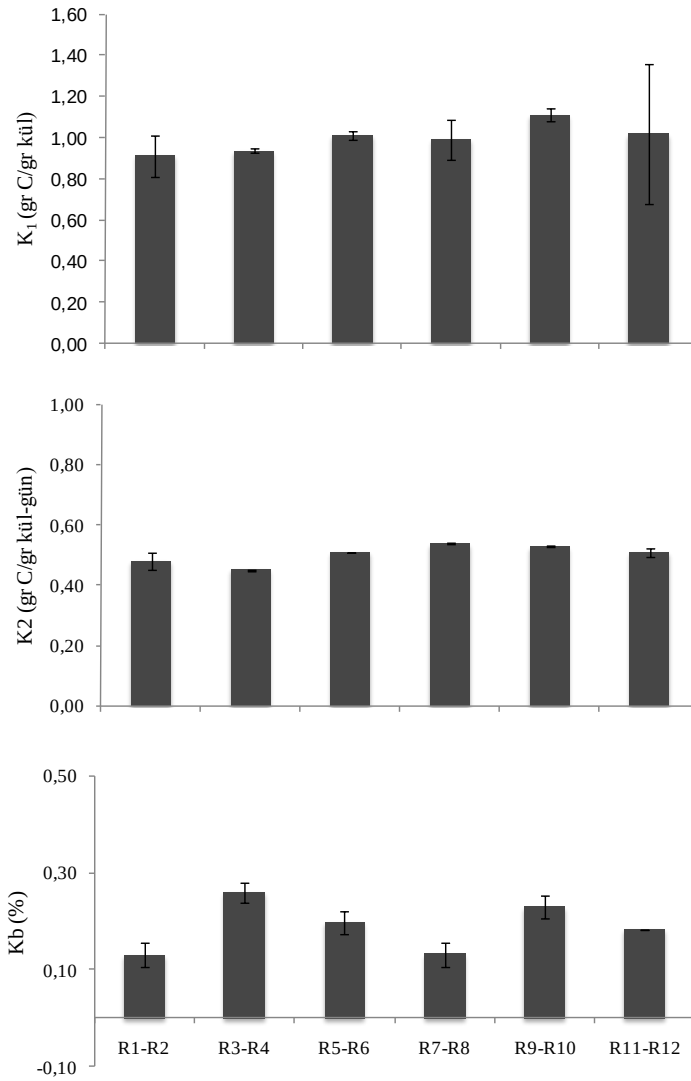
(R: Reaktör; R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.7 Reaktörlerde çözünmüş KOİ nin zamanla değişimi.

Reaktörlerdeki biyolojik parçalanmayla birlikte KOİ'nin zamanla azalması tam olarak gerçekleşmemiştir. Reaktörlerdeki su muhtevasının yüksekliğinden kaynaklanabilecek olan bu durum tam olarak stabil olmayan ürün eldesine sebebiyet vermektedir.

6.1.3 Reaktörlerdeki Organik Madde Kaybı Üzerinden Kompost Kinetiği

Kompostlaştırma sürecinde her karışım için biyoayrışabilirlik, Bölüm 5.4 te verilen eşitlikler (6.1 ve 6.2) yardımıyla hesaplanmıştır. Reaktörlerdeki kompostlaştırma sürecinde karbon kaybı üzerinden kinetik katsayılar (K_1 , K_2 ve K_b) Şekil 6.8 de verilmiştir.



(R: Reaktör; R1-R2: Yonga/Biyolojik arıtma çamuru (2/1); R3-R4: Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R5-R6: Yonga /Arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); R7-R8: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru (2/1); R9-R10: Sentetik malzeme/Arıtma çamuru/prekot karışımı (2/0.5/0.5); R11-R12: Sentetik malzeme/Biyolojik arıtma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5); parantez içerisindeki değerler karışım oranlarıdır)

Şekil 6.8 Kompostlaştırma sürecinde reaktörlerdeki karışımlar için kinetik katsayılar.

Reaktörlerde gerçekleşen kompostlaştırma sürecinde organik madde içeriği tüm karışımlar için azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu süreçte kompostlaştırma süreci oldukça yavaştır. 7 haftalık kompostlaştırma sürecinde biyoayrışabilirlik %25 civarında sınırlı kalmıştır. Biyoayrışabilirliği ifade eden K_b değeri B (Yonga/Arıtma çamuru/prekot karışımı

(2/0.5/0.5)) ve C (Yonga /Aritma çamuru/ Organik evsel katı atık karışımı (2/0.5/0.5)) karışımları için sırasıyla %26 ve %20 ile sınırlı kalan maksimum karışımlardır. Kinetik katsayılarından K_1 değeri substratın enzime olan kimyasal ilgisi ile ters orantılıdır. Bu değer yüksek olması (>1) kullanılan substratın enzimlere olan ilgisinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. K_2 değeri, kompostlaştırma sürecinin sıcaklık, nem, havalandırma ve kimyasal koşullar gibi işletme parametrelerine bağlıdır. Söz konusu çalışmada kompostlaştırma sürecinde çevre şartları tüm karışımlar için aynıdır. Bu durumda K_2 değerinin oldukça düşük olması kompostlaştırma sürecinde sınırlayıcı faktörün çevre şartlarından kaynaklanmadığının, kullanılan karışımların enzim-substrat ilişkisinden kaynaklandığının bir göstergesi olduğu sonucuna varılabilir.

6.1.4 Reaktör Kompost Ürünü Özellikleri

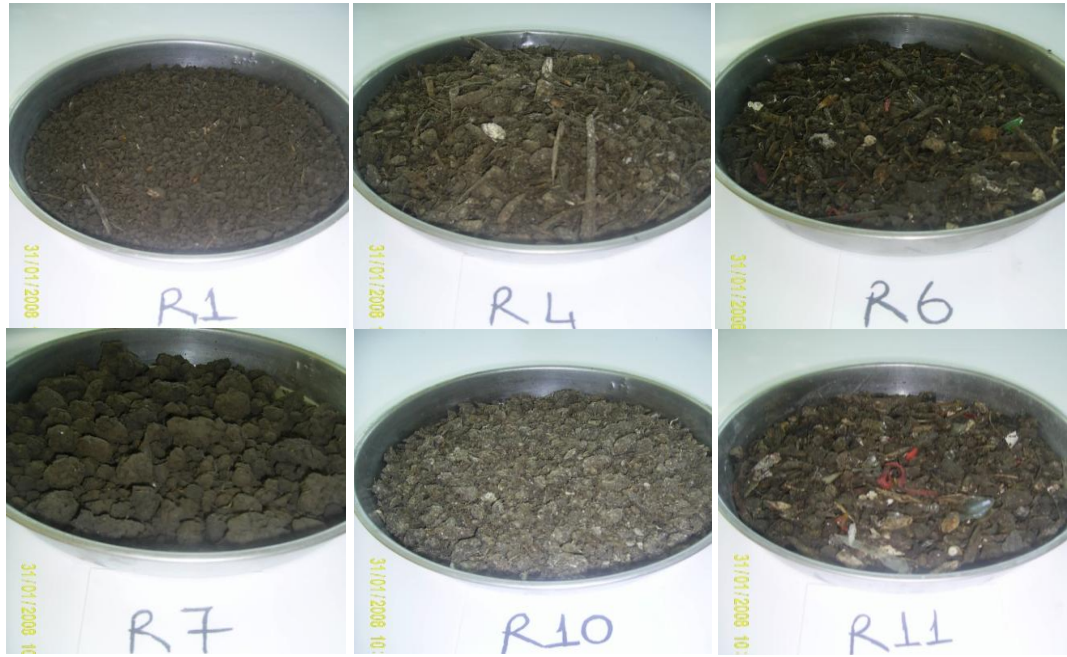
Reaktörlerde gerçekleştirilen kompostlaştırma süreci sonunda reaktörlerdeki malzemeler 15mm'lik elekten elenerek kompost ürünü elde edilmiştir. Üründe yapılan analizlerin sonuçları Çizelge 6.3' te verilmiştir.

Çizelge 6.3 Reaktör kompost ürün analiz sonuçları.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
pH	6,56	6,32	7,61	8,02	6,86	7,28	7,31	7,64	7,67	7,47	7,58	7,55
İletkenlik(μ S/cm)	2474	1953	2383	4250	2260	3340	2785	2930	5440	4490	4690	3230
Su muhtevası (%)	59	59	54	48	50	51	61	59	53	52	42	43
Organik mad. (%)	51,6	36,9	42,3	41,5	50,2	50,5	50,7	50,1	45,3	46,7	51,8	51,8
C/N	6,87	7,21	9,57	9,13	11,1	9,76	6,56	6,68	8,07	9,8	9,38	8,51
NH ₃ -N (mg/l)	6	9,5	400	455	8,5	7,6	11,5	13	630	520	40	38
KOİ (mg/l)	790	800	1700	8500	1100	1150	550	500	8000	1500	1350	1400
Cd (mg/kg)	2,2	2,2	2,5	1,4	2,2	2,4	2,2	2,5	1,4	1,8	2,3	2,3
Cr (mg/kg)	192,8	191,0	197,3	134,3	177,1	151,3	185,5	203,4	126,9	167,6	142,0	174,8
Cu (mg/kg)	234,9	232,8	237,1	132,9	210,7	179,6	237,7	249,5	130,9	181,4	173,0	215,3
Pb (mg/kg)	39,4	39,0	39,2	21,4	37,8	42,2	34,0	50,3	18,6	27,4	41,4	37,2
Ni (mg/kg)	89,2	88,4	90,7	59,1	83,2	73,0	87,9	95,9	66,1	88,2	69,6	82,9
Hg (mg/kg)	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
Zn (mg/kg)	698,2	691,9	700,0	417,8	714,7	535,6	674,8	773,2	418,1	555,8	531,8	619,1
Yoğunluk (kg/L)	0,608	0,549	0,378	0,431	0,459	0,498	0,654	0,698	0,348	0,312	0,517	0,542

(R:Reaktör)

İyi olgunlaşmış bir kompost ürünü; toprak görünümünde, koyu kahve veya siyah renkte olup istenmeyen kokuları barındırmaz. Kompostta istenmeyen kokuların olması ürünün hala ayrışma potansiyeli olduğu ve elde edilen ürünün stabilize olmadığını göstergesidir. Pilot reaktör çalışmalarında ilk üç hafta haricinde ciddi koku oluşumu tespit edilmemiştir. Elde edilen ürünler koyu kahverengindedir (Şekil 6.9).



(R:Reaktör)

Şekil 6.9 Reaktörlerden elde edilen kompost ürünü fotoğrafları.

Elde edilen üründe topaklanmaların olduğu ve havanın nüfuz edemediği bölgelerin bulunduğu Şekil 6.9 da görülmektedir. Özellikle sentetik malzeme hacim artırıcının kullanıldığı çamur reaktöründe topaklanmalar daha fazladır ve üründe su muhtevası en yüksek olan reaktördür.

Ürünün pH değeri, toprağın pH değerine yakın ve 6.5-8.0 aralığında olmalıdır. Daha düşük değerler, olgunlaşmanın tam gerçekleşmediğinin göstergesi olup toprağa ürünün uygulanması durumunda ayrışma devam edecek ve toprak yapısı bozulacaktır. pH'nın 8.5'den büyük olması durumunda ise amonyak kayıpları artmakta, koku oluşmakta ve bitki kökleri zarar görmektedir. Reaktörlerden elde edilen kompost ürününün pH sı bütün reaktörler için nötr seviyeye yakın olarak pH 6,32- 7,67 arasında değişmiş sadece R4 üründe pH 8,02 ye yükselmiştir. Elde edilen ürünlerin, pH değerleri açısından toprağa uygulanmasında topraklarda bir problem oluşturmayacağı söylenebilir.

Elektriksel iletkenlik, kompostun çözünebilir tuz içeriğini göstermektedir. İletkenlik değeri en

yüksek reaktörler sırasıyla R9, R11, R10 ve R4 tür. R4, R9 ve R10 prekot katkılı, R11 ise organik evsel atık katkılıdır.

Kompost ürününün birim hacim ağırlığının, taşıma ve kullanım kolaylığı ile toprağa faydasının belirlenmesi açısından su muhtevası önemlidir. Bu nedenle, ürün kullanımının kolaylığı için su muhtevası minimum %30, maksimum %50 olmalıdır. Elde edilen ürünlerden R1, R2, R7, R8 haricindekilerin su muhtevalarının uygun aralıkta olduğu tespit edilmiştir. Çamur yonga karışımlı reaktörlerin (R1, R2, R7, R8) su muhtevaları % 60 civarındadır. Bu durumda, hacimsel olarak 2/1 olan yonga/çamur oranının, biyolojik ayrışma için yeterli gözenek sağlayamadığı söylenebilir.

Organik madde (OM) önemli toprak bileşenlerindendir. Su tutma kapasitesi, toprak yapısı ve besin maddesi alımında önemli rol oynamaktadır. Ürünün organik madde içeriğinin en fazla %40 olması tavsiye edilmektedir. Buna göre, R2, R3, R4 haricindeki tüm ürünlerin OM değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Prekotun eklendiği reaktörlerde, OM açısından organik atık katkılı reaktörlere göre daha düşük OM değerli yani daha stabil bir ürün elde edilmiştir. Üçüncü haftada R3 ve R9 a bir miktar daha prekot, R6 ve R11 e de bir miktar organik atık ilave edilmiştir. Bu reaktörlerden elde edilen ürünle, ekstra katkı malzemesi ilave edilmeyenler arasında yaklaşık aynı OM içeriğinin çıkmış olması ise ekstra prekot ve organik atık ilavesinin OM giderimini etkilemediğini göstermektedir.

Üründeki C/N değerlerinin toprak kalitesini bozmaması açısından 20'nin altında olması tavsiye edilmekte olup, çalışmada elde edilen ürün C/N oranlarının uygun seviyelerde olduğu görülmektedir.

Suda çözünen karbon miktarı (KOI) olgunluk seviyesini göstermesi açısından önemlidir. Üründeki suda çözünen karbon miktarı proses içinde ayrıştırılmayan hümik asitlerden kaynaklanmaktadır ve konsantrasyonu %1.7'den düşük olmalıdır. Reaktörlerde başlangıç KOI miktarına göre üründeki KOI değerleri daha yüksektir. Özellikle, üçüncü haftada ekstra prekot ve organik atık eklenen reaktörlerin ürünlerindeki KOI değerleri oldukça yüksektir. Bu durum, bütün reaktörlerde biyolojik stabilizasyonun tamamlanamadığını göstermektedir.

Biyolojik çamurun kompostlaştırma prosesine tabi tutulması ile elde edilen stabil ürün düzenli depolama sahalarında depolanabileceği gibi tarım amaçlı da kullanılabilir. Nihai ürün olan kompostun kullanım amacına bağlı olarak, ağır metal konsantrasyonları farklı limitlere tabidir. Kompost ürününün toprakta kullanımında müsaade edilen ağır metal sınır değerleri Çizelge 6.4 te verilmiştir.

Çizelge 6.4 Kompostun toprakta kullanımında mücadele edilen maksimum ağır metal içerikleri.

Parametre	Sınır Değerler (mg/kg)				
	EKAÇTKY	EEC 278/86	EU 488 98	TKB OGT	ABD
Pb	750	750-1200	100	150	250-700
Cd	10	20-40	10	3	10-15
Cr	1000	-	100	270	1000
Cu	1000	1000-1750	100	450	450-1000
Ni	300	300-400	50	129	50-200
Zn	2500	2500-4000	300	1100	900-2500
Hg	10	16-25	1	5	5-10

(EKAÇTKY: Evsel ve kentsel arıtma çamurlarının toprakta kullanılmasına dair yönetmelik; TKB OGT: Tarım ve Köyişleri Bakanlığı organik gübre limitleri; EEC 278/86: Arıtma çamurların toprakda kullanımı için sınır değerler; EU 488/98: Ekolojik tarım (Eko-Etiket) için kabul edilebilir limitler; ABD: Amerika Birleşik Devletleri)

Reaktörlerden elde edilen nihai kompost ürünündeki ağır metal konsantrasyonları, başlangıç karışımlarının ağır metal konsantrasyonlarından yüksektir. Biyolojik parçalanmayla oluşan fermentasyon kaybı, kuru madde miktarındaki ağır metal konsantrasyonlarını artırmaktadır. Kompostlaştırma sonucunda ağır metal konsantrasyonlarındaki artış, bütün reaktörler dikkate alındığında paralellik göstermektedir. Bütün reaktörlerden elde edilen kompost ürünü, ağır metal konsantrasyonları çizelgede verilen sınır değerlerle mukayese edildiğinde; Cd, Pb, Hg bütün sınır değerlerin, Ni, Cr, Cu, Zn ise EU 488 98 eko etiket sınır değerleri hariç bütün limitlerin altında kaldığı görülmektedir.

6.2 Aktarmalı ve Statik Yığın Kompostlaştırma Çalışmaları

6.2.1 Aktarmalı ve Statik Yığınlardaki Başlangıç Hammadde ve Karışımların Özellikleri

Aktarmalı ve statik yığınlarda kullanılan malzemeler ve oluşturulan yığın karışımlarında gerçekleştirilen giriş malzeme analizleri Çizelge 6.5 te verilmiştir.

Kompostlaştırma proseslerinde başlangıçta tavsiye edilen pH aralığı 5,5-9 olup yığınlarda pH 5,21-7,31 aralığında değişmektedir. Prekot katkılı yığında prekotun düşük pH etkisinden dolayı karışımın pH değeri 5,21 dir.

Mikrobiyal parçalanma için gerekli nem oranı, başlangıçta %50-70 aralığında olması tavsiye edilmektedir (WEF, 1995a). Yığınlardaki su muhtevaları %51-62 aralığında değişmekte olup tavsiye edilen aralıkta kalmaktadır.

Yığınlarda organik madde içeriği başlangıçta %59-63, C/N oranları ise çamur yığını hariç 16-21 aralığında değişmektedir. Çamur yığınının C/N değeri ise 11,46 dır.

Çizelge 6.5 Aktarmalı ve statik yığın malzemeleri başlangıç analizleri.

Parametre	Biyolojik çamur (BÇ)	Prekot (P)	Yonga (Y)	Organik atık (OA)	BÇ/Y/P (2/0,5/0,5)	BÇ/Y/OA (2/0,5/0,5)	BÇ/Y (2/1)
pH	6,83	4,06	7,57	6,51	5,21	7,16	7,31
İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2582	2990	600	4118	1822	2370	1700
Su muhtevası (%)	76,3	38,1	14,4	58,2	51,6	60,4	61,6
Organik mad. (%)	57,73	72,9	96,59	60,2	63,15	59,73	62,32
C (%)	28,73	33,54	45,58	30,8	35,15	32,8	33,57
N (%)	4,47	1,6	0,44	1,5	1,93	2,04	2,93
C/N	6,43	20,96	103,6	20,53	18,21	16,08	11,46
NH ₃ -N (mg/l)	140	180	30	60	85	150	86
KOI (mg/l)	4350	42900	2380	1650	7220	2840	3620
Cd (mg/kg)	1,3	0,1	0,1	0,84	0,5	2,23	0,8
Cr (mg/kg)	250	7,0	3,6	95,3	122,3	155,5	143,7
Cu (mg/kg)	161,7	3,6	3,3	146,8	83,0	152,3	154,4
Pb (mg/kg)	32,9	4,0	12,0	48	27,5	37,9	38
Ni (mg/kg)	74,5	3,2	1,4	10,7	45,7	36,82	23,5
Hg (mg/kg)	0,4	0,4	0,2	1,5	0,4	1,12	0,53
Zn (mg/kg)	769	111	18,9	297	361,0	410	566,3
P (g/kg)	5,0	5,6	6,1	1,5	5,7	1,81	1,01
Yoğunluk (kg/L)	0,59	0,517	0,125	0,513	0,413	0,39	0,383

(OA: Organik atık yığını; BÇ/Y/P: Biyolojik çamur/yonga/prekot yığını; BÇ/Y/OA: Biyolojik çamur/yonga/organik atık yığını; BÇ/Y: Biyolojik çamur /yonga yığını).

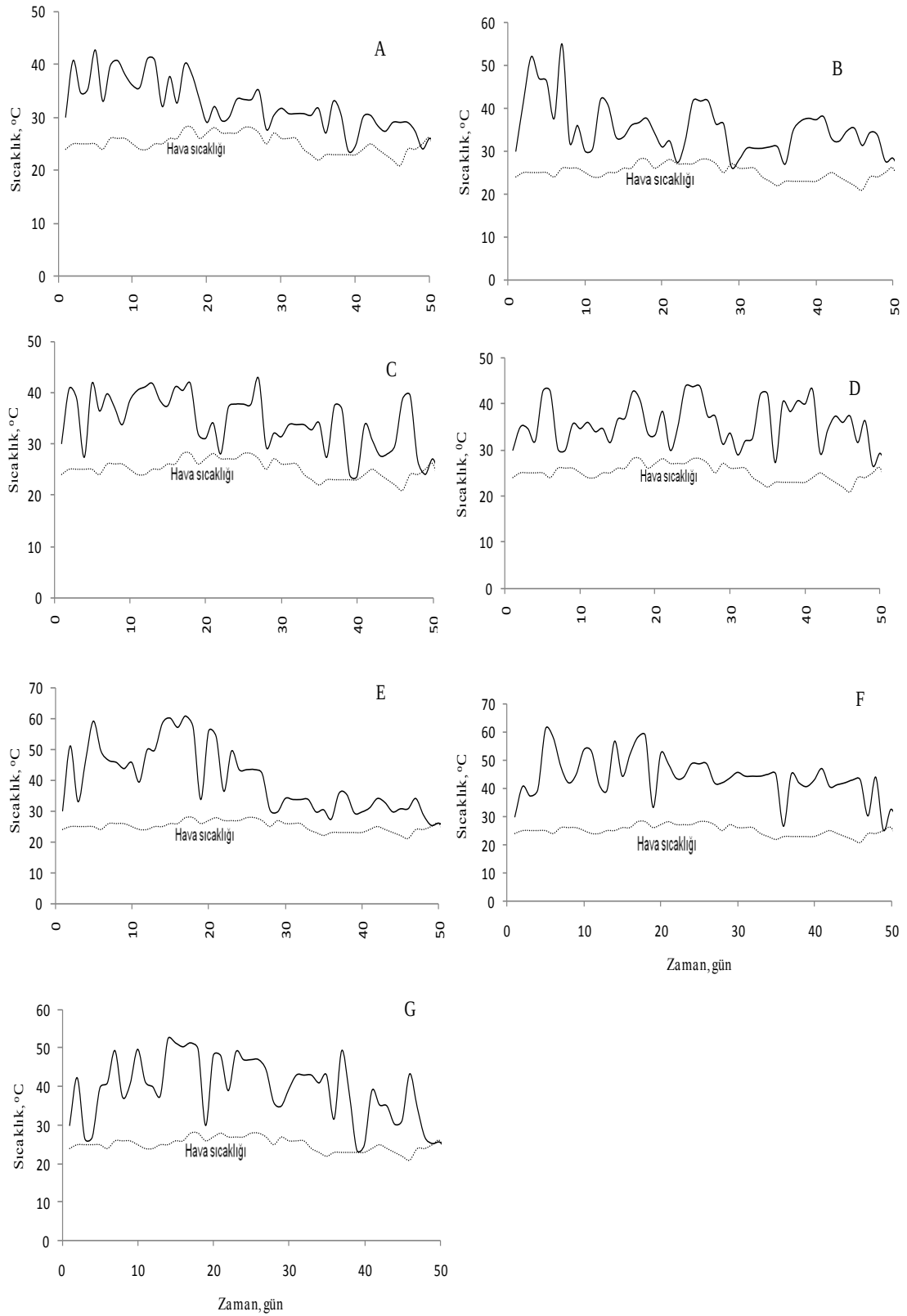
Aktarmalı ve statik yığın çalışmalarında kullanılan hammadde analizleri daha önce yürütülen pilot reaktör denemelerindeki aynı tür malzemelerin başlangıçtaki analizleriyle paralellik göstermektedir.

6.2.2 Aktarmalı ve Statik Yığın Kompostlaştırma Sürecinde Temel Parametrelerin Değişimleri

Aktarmalı ve statik yığınlarda kompostlaştırma sürecinde temel parametreler (pH, iletkenlik, su muhtevası, organik madde, amonyak, çözünmüş KOI haftalık olarak izlenmiş ve parametrelerdeki değişimler aşağıda açıklanmıştır.

6.2.2.1 Sıcaklık

Aktarmalı ve statik yığınlarda ölçülen sıcaklık değişimleri Şekil 6.10 da verilmiştir. Aktarmalı yığın sistemi ile kompostlaştırılan karışımlarla statik yığınlarda kompostlaştırılan aynı içerikli karışımların sıcaklıkları birbirleri ile uyum göstermiştir. Kontrol amaçlı kullanılan organik atık yığınları dahil olmak üzere tüm yığınlarda ilk haftada maksimum sıcaklıklara ulaşılmıştır.



(A: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); B: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık); C: Statik yığın (çamur+yonga); D: Aktarmalı yığın (çamur+yonga); E: Statik yığın (organik atık); F: Aktarmalı yığın(organik atık); G: Statik yığın (çamur+yonga+prekot))

Şekil 6.10 Aktarmalı ve statik yığınlarda sıcaklığın zamanla değişimi.

Organik atık yığınlarında, sıcaklıklar üç haftalık yoğun fermentasyon sürecinde 50-60 °C aralığında seyretmiştir. Sıcaklıklar üçüncü hafta içerisinde düşmeye başlamış ve dördüncü haftanın başlangıcından itibaren yavaş ayrışma evresine geçilmiş ve sıcaklıklar azalarak proses sonunda dış ortam sıcaklığına (~23 °C) düşmüştür. Elde edilen sıcaklıklar tipik kompostlaştırma sistemi sıcaklıklarına paralel olup bu sonuç kurulan sistemin fonksiyonelliğinin bir göstergesidir.

Organik atık katkılı statik yığında, sıcaklıklar ilk 3 haftada 35-45 °C aralığında değişmiş ve üçüncü hafta içerisinde düşmeye başlayarak sekizinci haftada dış ortam sıcaklığına kadar gerilemiştir. Organik atık katkılı aktarmalı yığında ise ilk haftada sıcaklıklar 55 °C' ye kadar yükselmiş ancak birinci haftadan sonra ani bir düşüşle 40 °C seviyelerine gerileyerek son haftaya kadar azalarak devam etmiş ve dış ortam sıcaklıklarına eşitlenmiştir.

İlave katkı malzemesi olmayan statik çamur yığında sıcaklıklar ilk üç hafta 40 °C seviyelerinde seyretmiş akabinde azalarak ortam sıcaklığına kadar gerilemiştir. Aktarmalı çamur yığında ise sıcaklıklar ilk hafta 40 °C nin üzerine çıkmış ancak ikinci hafta 35 °C civarına gerilemiş üçüncü haftada ise tekrar 40 °C nin üzerine çıkarak diğer haftalarda aktarmaya bağlı olarak salınım göstererek proses sonuna kadar ortam sıcaklığına gerilemiştir.

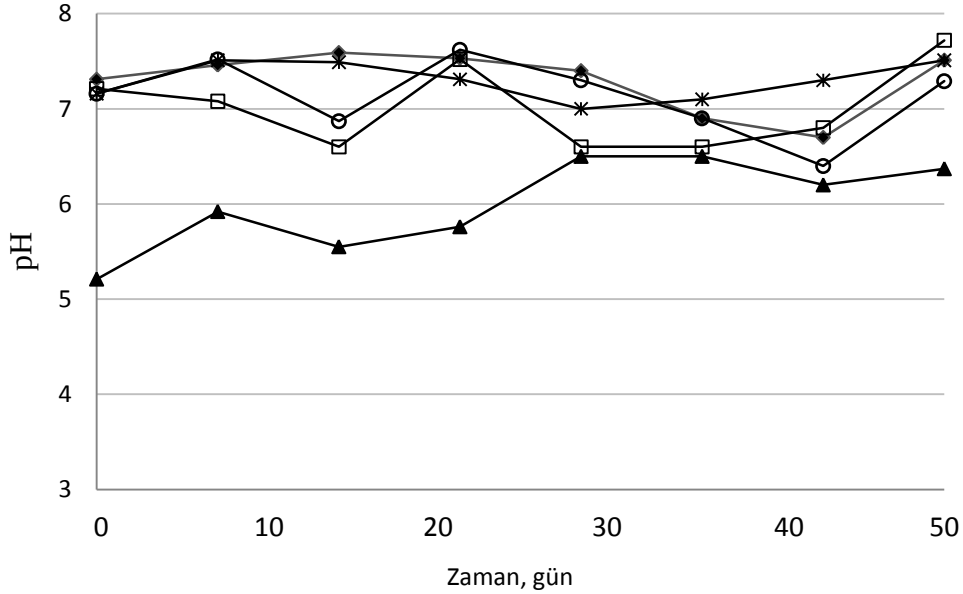
Prekot katkılı statik yığında sıcaklıklar ilk haftadan başlayarak tedrici bir şekilde artmış ve ikinci haftada 55 °C civarına ulaşarak üçüncü hafta sonuna kadar bu seviyelerde seyretmiş ve akabinde azalarak son haftada dış ortam sıcaklık seviyesine gerilemiştir.

Statik yığın ve aktarmalı yığın kompostlaştırmada, kütlenin dış yüzeyindeki sıcaklık merkezinden daha düşük olduğu için, merkezdeki sıcaklığın 55°C'den yüksek tutulması tavsiye edilmektedir. Atığın dezenfeksiyonuna ihtiyaç duyulmuyorsa, düşük sıcaklıklarda daha hızlı stabilizasyon gerçekleşebilir. Yığınlarda gerçekleştirilen kompostlaştırma sürecinde aktarmalı ve statik yığınlardan çamur yığınları ile organik atık katkılı yığınların tavsiye edilen sıcaklık (55 °C, 5 gün) seviyelerini tam olarak sağlayamadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte prekot katkılı yığın tavsiye edilen sıcaklıklara ulaşmıştır. Bu sonuçtan hareketle, organik evsel atığa mukayese edildiğinde prekot katkısının sisteme daha fazla mikroorganizmalarca kolay parçalanabilir karbon sağlandığı söylenebilir.

Bütün yığınlarda sıcaklıkların ilk haftada maksimum değerlere ulaşmış olması havalandırmanın tüm sistemde etkin bir şekilde sağlandığının göstergesidir. Bütün olarak değerlendirildiğinde yürütülen denemelerdeki sıcaklık-zaman profillerinin birbirlerine benzer yapıda ve tipik kompostlaştırma süreci davranışına uygun olduğu gözlenmiştir.

6.2.2.2 pH

Yığınlarda kompostlaştırma sürecinde pH değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.11 de verilmiştir.



(▲: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); □: Statik yığın (çamur+yonga); ○: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); ◆: Aktarmalı yığın (çamur+yonga); x: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık))

Şekil 6.11 Aktarmalı ve statik yığınlarda pH'nın zamanla değişimi.

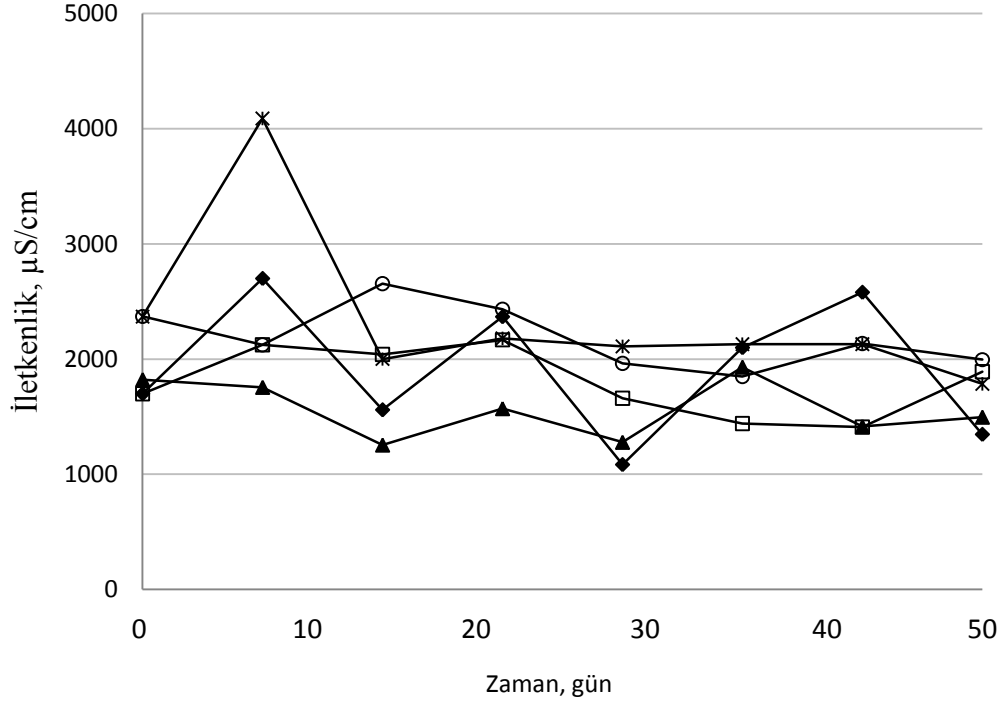
Prekot katkılı statik yığının başlangıçta yaklaşık 4,5 olan pH değeri ilk iki haftada biyolojik ayrışma etkisiyle pH 6 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, havalandırmanın etkin sağlandığının ve aerobik mikrobiyal ayrışmanın gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Mekanik havalandırılmalı proses ile karşılaştırıldığında aktarmalı yığın metodu ile yeterli oksijenin sistemde sağlandığı görülmektedir. Mikrobiyal aktivite için gerekli olan bu pH değerleri proses süresince tüm yığınlarda nötr değere doğru ilerlemiş ve proses sonunda prekot katkılı yığın yaklaşık pH 6, diğer yığınlar ise pH 7.5 seviyesinde kalmıştır.

6.2.2.3 İletkenlik

Elektriksel iletkenlik, komposttaki çözünmüş tuz konsantrasyonu hakkında fikir vermesi açısından düzenli olarak ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.12 de verilmiştir.

Biyolojik arıtma çamurunun elektriksel iletkenlik (EI) değeri yaklaşık 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iken prekot katkılı yığın başlangıç EI değeri ortalama 4200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ değerine yükselmiştir. Bu durum, prekotun yüksek iletkenlik içeriğinden kaynaklanmaktadır. Sıcaklığın yüksek olduğu prosesin ilk 3 haftasında organik maddenin çözünmesi ve hızlı ayrışmanın etkisiyle organik

atık katkılı aktarmalı yığın, statik çamur yığını ile aktarmalı çamur yığını Eİ değerlerinde yükselme gözlenmiştir. Proses ilerledikçe bütün yığınlarda iletkenlik değerleri azalmış ve proses sonunda 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığına gelmiştir.



(▲: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); □: Statik yığın (çamur+yonga); ○: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); ◆: Aktarmalı yığın (çamur+yonga); ×: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık))

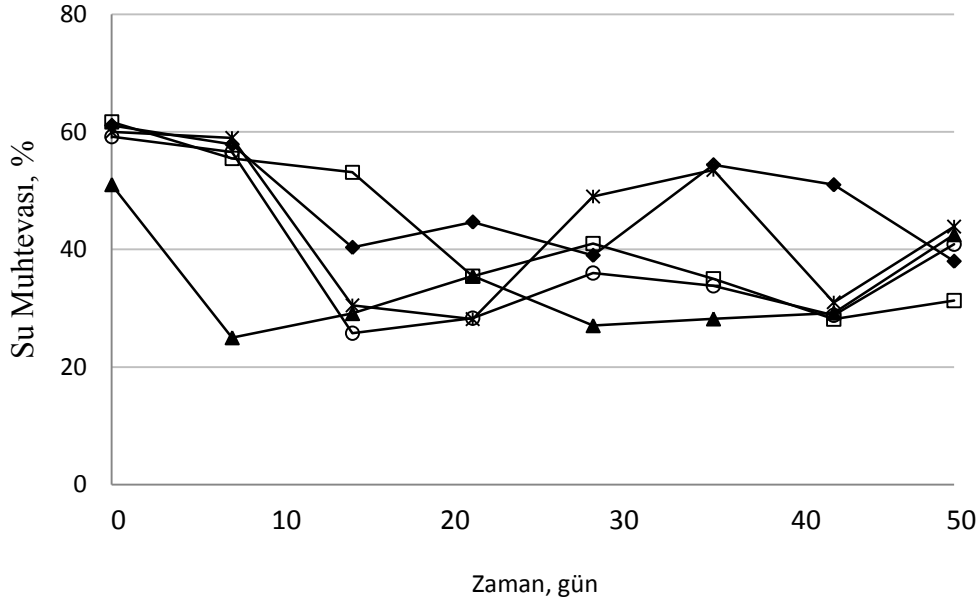
Şekil 6.12 Aktarmalı ve statik yığınlarda iletkenliğin zamanla değişimi.

6.2.2.4 Su Muhtevası

Proses başlangıcında, atık yapısında mevcut olan su muhtevası proses ilerledikçe mikrobiyal aktiviteler ile artmakta ancak havalandırma, sıcaklık artışı ve sızıntı suyunun oluşması ile de ortamdan uzaklaşmaktadır. Mikrobiyal aktivitenin gerçekleşmesi için en az %40 ve havalandırmanın etkin olarak sağlanabilmesi için ise maksimum %70 su muhtevası değerleri proses süresince muhafaza edilmelidir. Yığınlarda ölçülen su muhtevası değerleri Şekil 6.13 te verilmiştir. Yığınlarda su muhtevası haftalık olarak kontrol edilmiş olup su muhtevası %35-60 arasında olacak şekilde su ilavesi yapılmıştır. Hesaplanan miktardaki su ilavesi aktarmalı yığınlar karıştırma sırasında fıskiye ile, statik yığınlar ise üstten fıskiye şeklinde su verilerek yapılmıştır. Son haftada yağışlar sebebi ile yığına su ilavesine gerek görülmemiştir.

Başlangıçta en düşük su muhtevası (%50) prekot katkılı statik yığında mevcut iken diğer yığınlarda su muhtevası % 60-65 aralığında olmuştur. Bütün yığınlarda su muhtevası ilk üç haftada hızlı bir düşüş göstererek %30-60 aralığına gerilemiş ve zamanla azalmaya devam

ederek sekiz hafta sonunda %35-40 seviyelerine ulaşmıştır. Prekot katkılı statik yığın ikinci haftadan sonra yedinci haftaya kadar %20 seviyelerine düşmüştür. Ancak diğer yığınlar çalışma süresince kompostlaştırma prosesi için tavsiye edilen aralıkta (%40-70) kalmıştır. Bununla birlikte yığınlar son haftada su ilavesi yapılmamış olmasına rağmen meydana gelen yağışlar sebebiyle elde edilen ürünün su muhtevası %45 seviyelerine yükselmiştir.



(▲: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); □: Statik yığın (çamur+yonga); ○: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); ◆: Aktarmalı yığın (çamur+yonga); x: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık))

Şekil 6.13 Aktarmalı ve statik yığınlar da su muhtevasının zamanla değişimi.

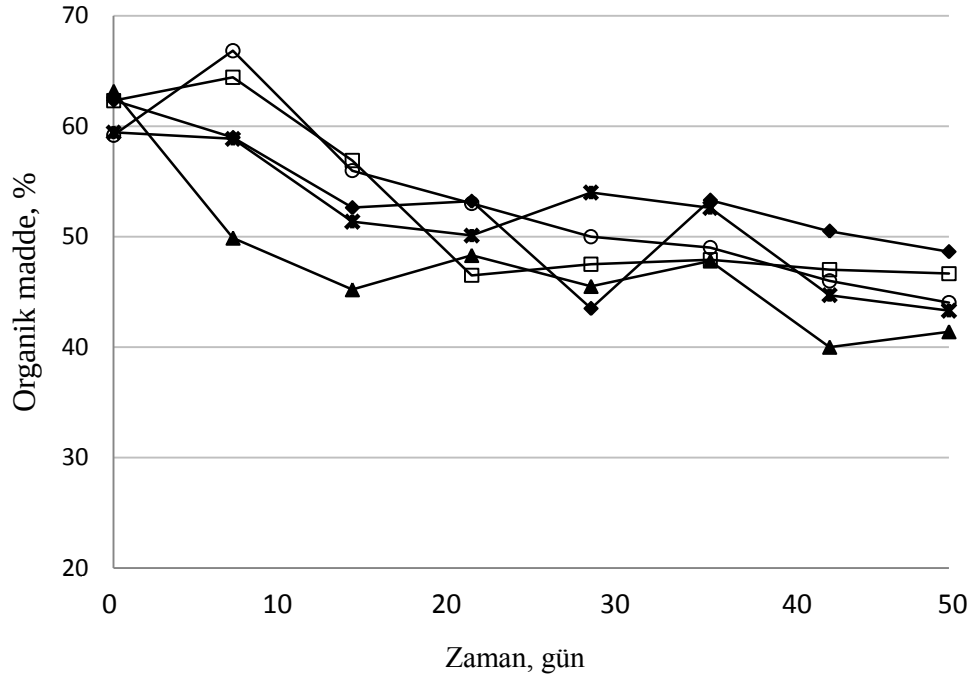
Sistemden vakumla birlikte gelen su, kondens suyu tutucuda tutularak tahliye edilmiştir. İlk iki hafta su muhtevelarında artış saptanmıştır. Bu artış hızlı ayrışmanın gerçekleştiğinin ve mikrobiyal aktivite ile su üretiminin olduğunun göstergesidir.

Tüm proseslerde su muhteveları etkin havalandırmayı olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde mikroorganizmalar için gerekli su ihtiyacını karşılayacak düzeyde tutulmaya çalışılmıştır. Ancak açık havada yapılan aktarmalı yığın hava koşullarından kapalı sisteme oranla daha fazla etkilendiğinden işletmede uygun yer seçimi veya kapatma yöntemi ile olumsuz etkiler ortadan kaldırılabilir ve kapalı sistemler ile su muhtevelarında tam uyum rahatlıkla sağlanabilir.

6.2.2.5 Organik Madde

Aktarmalı ve statik yığınların tamamında organik madde (OM) değerleri zamanla azalmıştır (Şekil 6.14). Prekot katkılı yığında başlangıçta yaklaşık %73 olan OM değeri, zamanla

azalarak proses sonunda %40 seviyelerine inmiştir. Diğer yığınlarda başlangıçta OM %55-63 aralığında iken kompostlaştırma prosesi sonunda %40-48 aralığında kalmıştır.



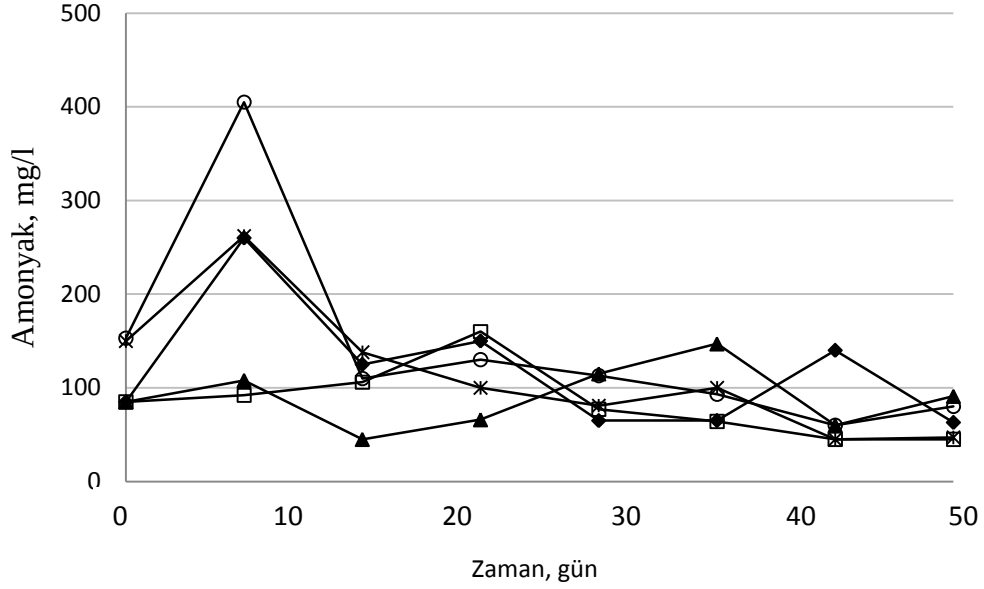
(▲: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); □: Statik yığın (çamur+yonga); ○: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); ◆: Aktarmalı yığın (çamur+yonga); x: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık))

Şekil 6.14 Aktarmalı ve statik yığınlarda organik maddenin zamanla değişimi.

6.2.2.6 Amonyak

Amonyak, kompostlaştırma sırasında atmosfere yayılan azotun en genel formudur. Amonyak, protein, üre ve diğer azot içeren organik maddelerin ayrışması sonucu açığa çıkmaktadır. Atık içerisindeki NH_3 oluşumunu kontrol eden şartlar, havaya NH_3 kaybını arttırmaktadır. Bhoyar vd. (1979), NH_3 oluşumunun en çok olduğu sıcaklığı 60-70°C olarak bulmuşlardır. Ancak, bu durumda azot kaybının minimize edileceği işletme koşulları, organik maddenin yeterli derecede stabilizasyonu ve patojenlerin yok edilmesi için gerekli işletme koşullarıyla çelişmektedir.

Başlangıçta organik atık yığını, prekot katkılı, organik atık katkılı ve katkısız çamur yığınlarında TKN değerleri sırasıyla %1,5, %2,2, %2,5 ve %2,9, amonyak değerleri ise sırasıyla %0,06, %0,085, %0,15 ve %0,086 olarak ölçülmüştür. Bu sebeple proses başlangıcında azotun tümünün organik formda olduğu kabul edilebilir. Başlangıçta azotun büyük bir kısmı organik azot formunda olduğu için NH_4^+ -N miktarları düşüktür. Aktarmalı ve statik yığınlarda amonyağın zamanla değişimi Şekil 6.15 te verilmiştir.



(▲: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); □: Statik yığın (çamur+yonga); ○: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); ◆: Aktarmalı yığın (çamur.+yonga); x: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık))

Şekil 6.15 Aktarmalı ve statik yığınlarda amonyağın zamanla değişimi

Sikora ve Sowers (1985) yaptıkları laboratuvar ölçekli kompost reaktörlerinde sabit havalandırmalı sistemlerdeki NH_3 çıkışının sıcaklık kontrollü havalandırma sistemlerindeki göre daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumda, NH_3 kaybı direkt olarak mikrobiyal ayrıştırma aktivitesine ve sistemden giderilen nem oranına bağlı olduğu kabul edilebilir.

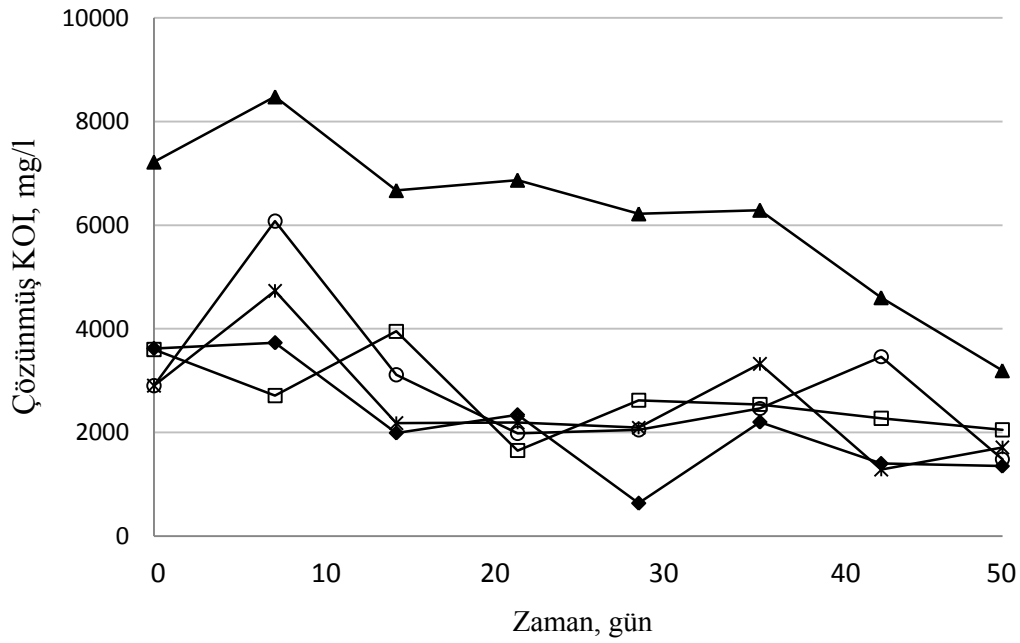
Kompostlaştırma sırasında, azotun gaz formuna geçerek kaybına neden olan diğer azot dönüşümleri nitrifikasyon ve bunu takip eden denitrifikasyondur. Nitrifikasyonu kısıtlayıcı temel faktörler sıcaklık ve nem olduğundan, nitrifikasyon sıcaklığın düştüğü ve yeterli oksijenin bulunduğu kompostlaştırma prosesinin son dönemlerinde gerçekleşmektedir.

Yığınlarda ilk haftalarda amonyak artışı maksimum değerlere ulaşmıştır. Bunun nedeni, organik maddelerin ayrışmasının hızlı olmasıdır. Başlangıçta 25-250 mg/l seviyelerinde olan amonyak değeri üçüncü haftadan sonra 50-150 mg/l aralığına gerileyerek proses sonuna kadar benzer şekilde devam etmiştir. Bu durum, yoğun fermentasyonun yaşandığı ilk üç haftadan sonra yavaş parçalanmanın ve olgunlaşmanın bir göstergesidir.

6.2.2.7 Çözünmüş KOİ

Aktarmalı ve statik yığınlarda, kompostlaştırma sürecinde KOİ (suda çözünen karbon) değerlerinin zamanla değişimi Şekil 6.16 da verilmiştir. Organik yapılı olan prekötün çamura ilave edilmesi sonucu, preköt katkılı yığında başlangıçta KOİ değeri diğer reaktörlere oranla yaklaşık olarak 2,5 kat daha yüksektir. Sıcaklığın yüksek değerlere ulaştığı ilk iki haftada KOİ

önemli miktarda azalmıştır. Yığınlarda proseste gerçekleşen ayrışmanın yaklaşık %80'inin ilk üç hafta içerisinde tamamladığı belirlenmiştir. Üçüncü haftadan sonra değerlerde salınımlar olmasına karşın ayrışmanın fazla olmadığı gözlenmiş olup, bu durum, sıcaklık profillerine paralellik göstererek ilk üç haftanın hızlı ayrışma evresi, sonraki haftaların ise yavaş ayrışma safhası olduğunu göstermektedir. Proses sonundaki KOİ değerlerine bakıldığında prekot ilave edilen yığında daha yüksek KOİ gözlenirken, diğer yığınların proses sonu KOİ değerleri birbirine yakın çıkmıştır.



(▲: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); □: Statik yığın (çamur+yonga); ○: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); ◆: Aktarmalı yığın (çamur+yonga); x: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık))

Şekil 6.16 Aktarmalı ve statik yığınlarda KOİ'nin zamanla değişimi.

6.2.2.8 Havalandırma

Havalandırma, kompostlaştırmayı gerçekleştiren havalı mikroorganizmalar için gerekli olan oksijeni sağlaması, oluşan hava akımı ile mikrobiyal reaksiyonlarda üretilen karbondioksit ve suyu uzaklaştırması, ayrıca ısı transferi ile de ısıyı gidermesi açısından önemlidir.

Hızlı ayrışma evresinde, sistemden vakumla hava emişi yapılarak emilen hava biyofiltreden geçirilerek koku kontrolü sağlanmıştır. Yavaş ayrışma periyotlarında, hava miktarı hızlı fermentasyon sürecine kıyasla azaltılmıştır. Sıcaklıklar dikkate alınarak sisteme sağlanan hava miktarları ayarlanmıştır. Yığınlara 15'er dakikalık periyotlarda çalıştırılan blowerla temin edilen hava miktarları Çizelge 6.6 da verilmiştir.

Çizelge 6.6 Aktarmalı ve statik yığınlar verilen hava miktarı.

	Yığın No	İçeriği	Hacimsel Oran	Toplam Hacim (m ³)	Yığınlar temin edilen hava (m ³ / m ³ .saat)
Statik yığınlar	1	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	26	4,5
	2	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru	2 / 1	26	4,5
	3	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	26	4,5
	4	Organik evsel katı atık	1	26	4,5
Aktarmalı Yığınlar	5	Organik evsel katı atık	1	13,5	Haftada bir karıştırma
	6	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru	2 / 1	17	Haftada bir karıştırma
	7	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	17	Haftada bir karıştırma

Van der Heide ve Eisma'ya (1997) göre de pratikteki gerçek hava ihtiyacı 2-5 m³/m³-saat aralığında değişmektedir. Aktarmalı yığınlar haftada bir karıştırılmak suretiyle yığınlar hava temin edilmiştir. Statik yığınlar blower vasıtasıyla temin edilen hava miktarları dikkate alındığında tavsiye edilen aralıkta kaldığı görülmektedir.

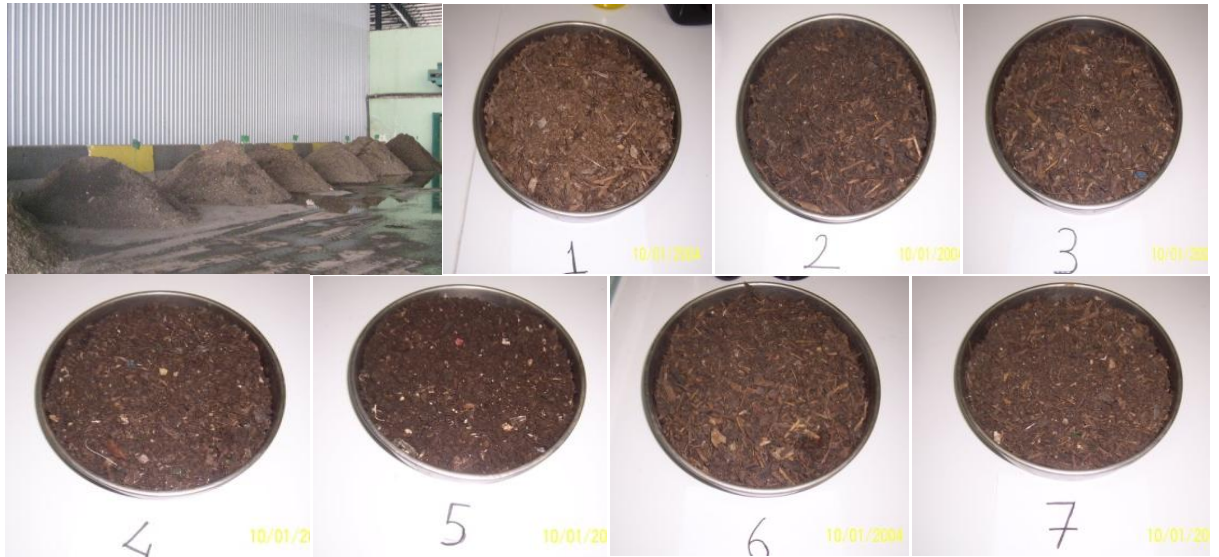
6.2.3 Aktarmalı ve Statik Yığın Kompost Ürünü Özellikleri

İyi olgunlaşmış bir kompost ürünü toprak görünümünde, koyu kahve veya siyah renkte olup istenmeyen kokuları barındırmaz. Kompostta istenmeyen kokuların olması ürünün hala ayrışma potansiyeli olduğu ve elde edilen ürünün stabilize olmadığına göstergesidir. Yığın çalışmalarında ilk üç hafta haricinde ciddi koku oluşumu tespit edilmemiştir. Yığınlar yürütülen çalışmada sekizinci haftada yığın malzemeleri 15 mm lik elekten elenerek elek altı malzeme nihai kompost ürünü olarak elde edilmiştir. Üründe yapılan analizlerin sonuçları Çizelge 6.7 de verilmiştir. Elde edilen ürünler koyu kahverenginde olup ürünlere ait resimler Şekil 6.17 de verilmiştir.

Çizelge 6.7 Aktarmalı ve statik yığın kompost ürünleri analiz sonuçları.

Parametre	A	B	C	D	E	F	G	H
pH	6,37	7,29	7,7	7,45	7,68	6,98	7,44	7,23
İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1496	1850	1840	8345	8985	1347	1638	8050
Su muhtevası (%)	42,5	40,9	39	42	44	38	43,9	26
Organik madde (%)	41,4	44,03	46,65	42,1	40,3	48,64	43,29	36
C (%)	25,26	28,89	22,36	24,56	23,34	31,21	26,98	24,64
N (%)	2,46	1,9	1,35	2,1	2,06	1,85	1,63	1,71
C/N	10,27	15,24	16,62	11,7	11,33	16,89	16,52	14,41
NH ₃ -N (mg/l)	91	80	50	25	30	63	47	30
KOI (mg/l)	3190	1480	2050	1150	1255	1290	1307	1384
Cd (mg/kg)	0,8	1,3	1,2	1,4	1,9	1,0	1,2	1,5
Cr (mg/kg)	280	220	240	340	150	260	244	271
Cu (mg/kg)	108	400	210	244	300	180	425	560
Pb (mg/kg)	31,8	110,0	50,6	115,8	168,0	33,5	55,1	129
Ni (mg/kg)	60,26	36,99	24,92	27,50	23,81	25,33	24,99	87
Zn (mg/kg)	470	690	860	545	478	730	1065	630
P (mg/kg)	9100	2875	10525	2500	3000	11000	2985	2300

(A: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); B: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); C: Statik yığın (çamur+yonga); D: Statik yığın (organik atık); E: Aktarmalı yığın(organik atık); F: Aktarmalı yığın (çamur.+yonga); G: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık); H: İBB kompost tesisi ürün).



(1: Statik yığın (çamur+yonga+prekot); 2: Statik yığın (çamur+yonga+organik atık); 3: Statik yığın (çamur+yonga); 4: Statik yığın (organik atık); 5: Aktarmalı yığın(organik atık); 6: Aktarmalı yığın (çamur.+yonga); 7: Aktarmalı yığın (çamur+yonga+organik atık)).

Şekil 6.17 Aktarmalı ve statik yığın ürün numunelerine ait resimler.

Aktarmalı ve statik yığın çalışmalarında elde edilen kompost ürününün pH sı bütün yığınlar için nötr seviyeye yakın olarak pH 6,37- 7,7 arasında değişmiştir. Aktarmalı yığınlarla statik

yığınlar arasında pH değerleri açısından önemli bir fark gözlenmemiştir. Elde edilen ürünlerin pH değeri pH 6.-8.0 aralığında olduğundan, ürünlerin toprağa uygulanmasında topraklarda pH değerleri açısından bir problem oluşturmayacağı söylenebilir.

Organik atık yığını haricindeki yığınlarda iletkenlik değerleri başlangıçta 1700-2370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığında değişirken elde edilen üründe 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığında değişmiştir. Organik atık yığın ürünlerinde ise 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ seviyelerinde gerçekleşmiştir. Aktarmalı ve statik yığın ürünlerinin elektriksel iletkenlik değerleri arasında paralellik sözkonusudur.

Ürün su muhtevası minimum %30, maksimum %50 olmalıdır. Elde edilen ürünlerde su muhtevası %40-44 aralığında kalmış olup bu değerler tavsiye edilen aralıktadır. Aktarmalı ve statik yığın ürünleri su muhtevaları arasında belirgin bir fark yoktur.

Ürünün organik madde içeriğinin en fazla %40 olması tavsiye edilmektedir. Yığınlardan elde edilen ürünlerde OM değeri %41-48 aralığında değişmiştir. Prekot katkılı yığın ile organik evsel atık yığınları en düşük OM seviyelerine ulaşmış (%41), organik atık katkılı yığın ürünü OM %44 seviyelerinde kalarak daha yüksek olmuştur. En yüksek OM seviyesi (%48) katkı malzemesi kullanılmayan çamur yığnında gerçekleşmiştir. Aktarmalı ve statik yığın ürünleri OM seviyeleri paralellik göstermekte ancak her iki metotta da çamur yığınlarında topaklanmalar daha fazla olmuş ve OM değerleri diğer yığınlara göre daha yüksek kalmıştır.

Üründeki C/N değerlerinin toprak kalitesini bozmaması açısından 20'nin altında olması tavsiye edilmektedir. Yığın çalışmalarında elde edilen ürün C/N oranları 10-16 arasında değişmekte olup tavsiye edilen aralıktaki kaldığı görülmektedir. Prekot katkılı yığın C/N değeri 10,27 olarak gerçekleşmiş ve organik atık katkılı yığın ile katkısız yığınlara göre daha stabil bir C/N değerine ulaşmıştır. Aktarmalı ve statik yığın ürünleri C/N değerleri arasında paralellik sözkonusudur.

Yığınlardan elde edilen ürünlerde amonyak değerleri 25-91mg/l aralığında değişmiştir. Amonyak değerleri, statik yığın ürünlerinde aktarmalı yığın ürünlerine göre kısmen daha yüksek kalmıştır. Başlangıçta yığın karışımlarında 1650-7220mg/l aralığında olan çözünmüş KOI değerleri, elde edilen ürünlerde 1150-3190mg/l aralığında değişmektedir. Ürünlerde en yüksek KOI değeri, prekot katkılı yığına aittir. Aktarmalı ve statik yığın ürünleri arasında, KOI değerleri açısından paralellik mevcuttur.

Aktarmalı ve statik yığın denemelerinde, birer adet aktarmalı ve statik organik atık yığını sistemin perfonmasını ölçebilmek amacıyla kontrol amaçlı oluşturulmuştur. Aynı zamanda organik atık yığınlarından elde edilen ürün, yığınlara beslenen organik atığın temin edildiği

İBB kompost tesisinde; aynı organik atıktan elde edilen ürünle mukayese edilerek yığın çalışmalarında sağlanan şartlar ile de kontrol edilmiştir. İBB kompost tesisi ile aktarmalı ve statik organik atık yığınlarından elde edilen kompost ürünlerine ait analizleri Çizelge 6.7'de verilmiştir. Her iki prosese ait ürünlerin pH'ları 7,2-7,7 aralığındadır. Elektriksel iletkenlik değerleri giriş atığına göre bir miktar artarak 9000 $\mu\text{mhos/cm}$ civarında seyretmiştir. Tesis ürününün su muhtevası %34 iken, son haftalardaki yağışlardan dolayı, yığın ürünlerinde bu değer %42-44 civarındadır. Organik madde miktarı tesis ürününde % 36 iken yığın ürünlerinde bu değer %40-42 aralığındadır. Aynı şekilde, suda çözünen karbon miktarı tesis ürününde 13,84 g/kg iken yığınlardan elde edilen ürünlerde 11,5-32g/kg (1150-3190mg/l) civarındadır. Yığın metodu ile tesiste uygulanan kapalı sistem, ürün kalitesi açısından değerlendirildiğinde uyumluluk gösterdiği görülmüştür. Bu durumda, yığın metodu ile proses için gerekli havanın sağlanabildiği görülmüştür. Ancak, açık havada uygulandığı takdirde yığın metodunun hava şartlarından etkilendiği özellikle yağış ile su muhtevasının arttığı saptanmıştır. Bu durumda yığınların üzerinin örtülmesinin su muhtevasının ve özellikle aktarmalı yığınlarda koku kontrolü açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

Biyolojik parçalanmayla oluşan fermentasyon kaybı dolayısıyla, başlangıçtaki miktarlara mukayese edildiğinde ürün kuru madde miktarındaki ağır metal konsantrasyonları artmaktadır. Yığınlardan elde edilen ürünlerde, genelde paralellik mevcuttur. Ancak aktarmalı organik atık yığını ile statik organik atık yığını ürünlerinde Cr ve Zn değerlerinde, yine her iki metodun çamur yığınları ürünlerinde Pb ve Cu değerleri arasında belirli bir fark görülmektedir. Yığınlara beslenen hammadde kaynakları aynı olduğundan bu farklar alınan numunelerin temsiliyetinden kaynaklanabilir.

6.3 Statik Yığın Kompostlaştırma Çalışmaları

6.3.1 Statik Yığınlardaki Başlangıç Hammadde ve Karışımların Özellikleri

Üçüncü denemede tam ölçekli oluşturulan 4 adet havalandırılmalı statik yığın kompostlaştırma sisteminde kullanılan malzemelere ve yığınlardaki karışımlara ait başlangıç hammadde analizleri Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Kompostlaştırma proseslerinde, başlangıçta tavsiye edilen pH aralığı 5,5-9'dur. Statik yığınların başlangıç analizlerinde pH, organik atık yığını, organik atık katkılı yığın ve çamur yığınının sırasıyla 6,6; 6,82 ve 6,80 olup tavsiye edilen aralıktadır. Prekot katkılı yığında pH değeri 4,69 olup, prekotun düşük pH etkisinden dolayı karışımın pH'sı düşüktür. Bu değer kompostlaştırma prosesi boyunca yükselerek nötr seviyeye yaklaşmıştır.

Çizelge 6.8 Statik yığın başlangıç hammadde ve karışımların analizleri.

Parametre	Biyolojik	Prekot	Yonga	Organik	BÇ/Y/P	BÇ/Y/OA	BÇ/Y
	Arıtma Çamuru (BÇ)			Atık (OA)			
pH	6,67	3,53	6,24	6,60	4,69	6,82	6,80
İletkenlik (µS/cm)	4530	3530	1208	3830	2348	1665	1299
Su muhtevası (%)	78,83	35,97	11,93	62,44	58,695	56,5	62,695
Organik madde (%)	55,82	56,37	95,285	71	64,70	59,18	60,94
C (%)	27,67	30,25	45,66	33,57	35,68	31,89	34,90
N (%)	5,00	1,61	0,43	1,51	1,86	1,67	2,43
C / N	5,53	18,8	106,19	22,23	19,18	19,10	14,36
TKN (mg/l)	4367	1161	-	1433	-	1108	2314
NH ₃ -N (mg/l)	393	316	10	45	45	27	76
KOİ (g/kg)	5720	53500	1640	1860	7720	1420	2520
Cd (mg/kg)	1,72	0,96	2,16	0,61	0,97	2,68	0,24
Cr (mg/kg)	355,21	9,45	5,85	17,61	142,74	73,50	132,35
Cu (mg/kg)	272,40	4,84	7,08	35,35	127,00	76,85	149,07
Pb (mg/kg)	50,40	19,58	14,93	62,25	43,00	38,35	48,90
Ni (mg/kg)	121,45	-	-	8,77	61,20	34,57	76,52
Hg (mg/kg)	0,80	0,28	0,45	1,10	0,53	1,42	0,57
Zn (mg/kg)	871,95	22,38	39,83	220,58	410,55	380,14	483,43
Top P (g/kg)	13,32	2,26	0,0498	1,54	6,88	1,76	1,77
Yoğunluk (kg/L)	0,5282	0,3504	0,1332	0,4956	0,6502	0,4328	0,4478

(OA: Organik atık yığını; BÇ/Y/P: Biyolojik çamur/yonga/prekot yığını; BÇ/Y/OA: Biyolojik çamur/yonga/organik atık yığını; BÇ/Y: Biyolojik çamur /yonga yığını).

Mikrobiyal parçalanma için gerekli minimum nem oranı %12-15 arasındadır. Arıtma çamurlarının optimum nem muhtevası, hammaddenin kalınlığına ve kullanılan kompost teknolojisine bağlıdır. Arıtma çamurları için ilk nem muhtevası %55-60 olarak tavsiye edilir. Aktarmalı sistemlerde, aktarma sıklığı buharlaşma ve yeterli poroziteyi arttırdığından, nem muhtevası %60-65’lerde yönetilebilir (WEF, 1995a). Statik yığınlardaki su muhtevaları %56-63 aralığında değişmekte olup tavsiye edilen aralıkta kalmaktadır.

Yığınlarda organik madde içeriği, başlangıçta %59-71, C/N oranları ise çamur yığını hariç 19-22 aralığında değişmektedir. Çamur yığınının C/N değeri ise 14,3 dür. Tavsiye edilen C/N oranı başlangıçta 20-40 dır. Çamur yığını hariç, diğer yığınlara tavsiye edilen değerlere uygundur. Çamurun tek başına yonga ile karıştırılması ile, ortama biyolojik aktivite için yeterli kolay parçalanabilir karbon temin edilemediği söylenebilir.

Başlangıçta tavsiye edilen yoğunluk aralığı 0,5-0,7kg/L olup, yığınlardaki yoğunluklar 0,5-0,65kg/L arasında değişmektedir.

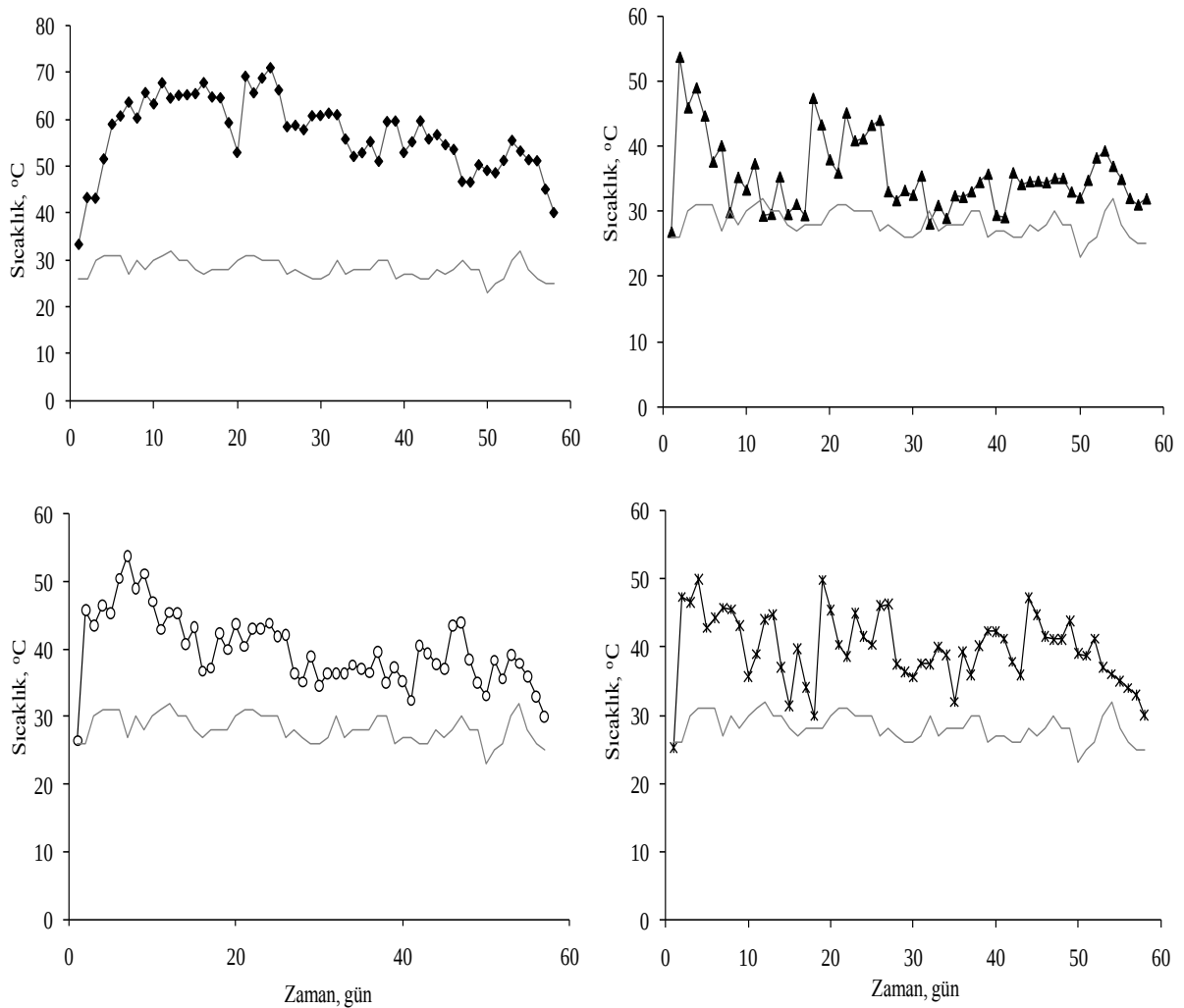
Statik yığın çalışmalarında kullanılan hammadde analizleri daha önce yürütülen pilot reaktör, aktarmalı ve statik yığın denemelerindeki aynı tür malzemelerin başlangıçtaki analizleriyle paralellik arz etmektedir.

6.3.2 Statik Yığın Kompostlaştırma Sürecinde Temel Parametrelerin Değişimleri

Tam ölçekli dört adet yığında sıcaklıklar günlük olarak diğer temel parametreler ise haftalık olarak takip edilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

6.3.2.1 Sıcaklık

Statik yığınlarda sıcaklığın zamana bağlı değişimi Şekil 6.18 de verilmiştir.



(◆: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; o: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını; *: Biyolojik çamur+Yonga+Organik atık yığını; Grafiklerde alt kısımdaki ince çizgi ortam hava sıcaklığını göstermektedir.)

Şekil 6.18 Statik yığınlarda sıcaklığın zamanla değişimi.

Statik yığın kompostlaştırmada, kontrol amaçlı kullanılan organik atık yığını dahil olmak üzere tüm yığınlarda ilk haftada maksimum sıcaklıklara ulaşılmıştır.

Organik atık yığnında sıcaklıklar üç haftalık yoğun fermentasyon sürecinde 60-70 °C aralığında seyretmiştir. Sıcaklıklar üçüncü haftadan sonra düşmeye başlamış ve dördüncü haftadan itibaren yavaş ayrışma evresine geçilmiş ve sıcaklıklar azalarak sekizinci haftada dış ortam sıcaklığına (~20 °C) düşmüştür. Elde edilen sıcaklıklar, tipik kompostlaştırma sistemi sıcaklıklarına paralel olup bu sonuç kurulan sistemin fonksiyonelliğinin bir göstergesidir.

İlave katkı malzemesi olmayan çamur yığnında, sıcaklıklar ilk haftada 55 °C ye kadar çıkmış ancak kısa sürede tekrar azalma seyrine girerek, üçüncü haftaya kadar 30 °C seviyelerine düşmüş, üçüncü haftada yeniden yükselerek yaklaşık on gün boyunca 45-50 °C seviyelerinde seyretmiştir. Akabinde düşüşe geçen sıcaklık değeri proses sonuna kadar 30 °C ye kadar düşmüştür.

Prekot katkılı yığnında sıcaklık ilk hafta 55 °C ye kadar çıkmış ve üçüncü haftaya kadar 45-55 °C aralığında seyretmiştir. Üçüncü haftadan sonra yavaş fermentasyon sürecinde sıcaklık azalmaya başlayarak proses sonuna kadar ortam sıcaklıklarına gerilemiştir. Bu sıcaklık değişimi tipik bir kompostlaştırma prosesi sıcaklık değişimine paraleldir.

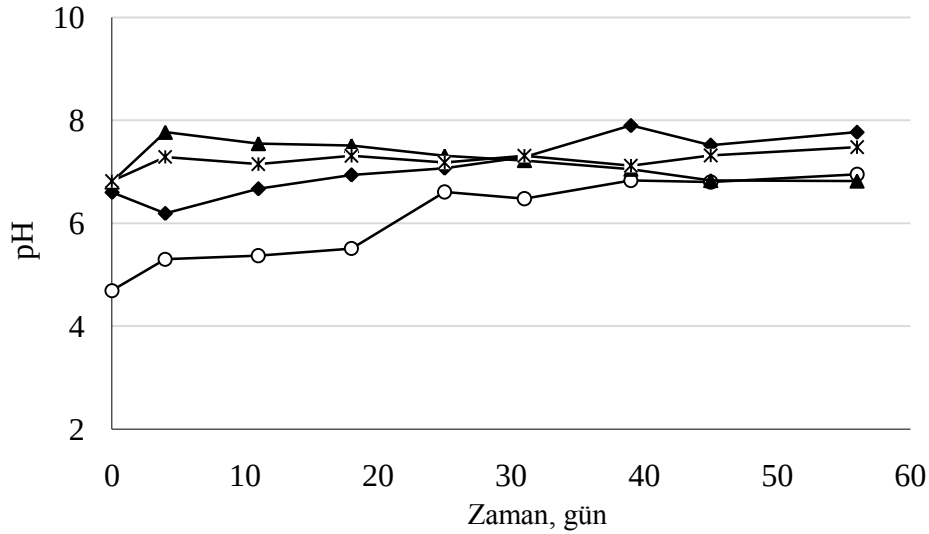
Organik atık katkılı yığnında sıcaklıklar ilk haftada 50 °C ye kadar çıkmış ve ikinci haftadan üçüncü haftaya kadar 35 °C ye kadar gerilemiş, üçüncü haftada yeniden aralığında değişmiş ve üçüncü hafta içerisinde düşmeye başlayarak sekizinci haftada dış ortam sıcaklığına kadar gerilemiştir. Organik atık katkılı aktarmalı yığnında ise ilk haftada sıcaklıklar 55 °C' ye kadar yükselmiş ancak birinci haftadan sonra hızlı bir düşüşle 40 °C seviyelerine gerileyerek sekizinci haftaya kadar azalarak devam etmiş ve dış ortam sıcaklıklarına eşitlenmiştir.

Yapılan pek çok kompostlaştırma deneylerinde, hızlı parçalanma periyodu boyunca ideal sıcaklığın yaklaşık 55 °C dolayında olduğu gözlenmiştir. (Strom, 1985).

Amerika Birleşik Devletlerinde, sıcaklık ihtiyacı düşük seviyelerde belirlenebilir patojenlerin azaltılması için 55 °C' nin üzerinde 3 gün (reaktör sistemler, havalandırılmalı statik yığınlar) ya da 55°C' nin üzerinde yığın 5 defa çevirilerek (açık kompostlaştırma) 15 gündür. Bu kapsamda değerlendirildiğinde organik atık yığını ile prekot katkılı yığın sıcaklık parametresi açısından tavsiye edilen aralıklarda seyretmiştir. Ancak yapılan pek çok çalışmada çamur kompostlaştırmada sıcaklıkların maksimum yaptığı zamanlarda 45-55 °C aralığında kaldığı görülmüştür.

6.3.2.2 pH

pH kontrolü, mikrobiyal ortamın ve kompostlaştırma sürecinin (atık stabilizasyonunun) değerlendirilmesinde önemli parametrelerdendir. Başlangıçta organik asitlerin oluşumu nedeniyle pH değeri düşük iken, proses ilerledikçe 8,0-8,5 seviyesine kadar ulaşmaktadır. Bu durum çoğunlukla, ortamdan CO₂ çıkışı ve proteinlerin ayrışmasından ileri gelmektedir (Sharma ve diğ., 1997). Yığınlarda kompostlaştırma sürecinde pH değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.19 da verilmiştir.



(◆: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; ○: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını);
*: Biyolojik çamur+Yonga+Organik atık yığını)

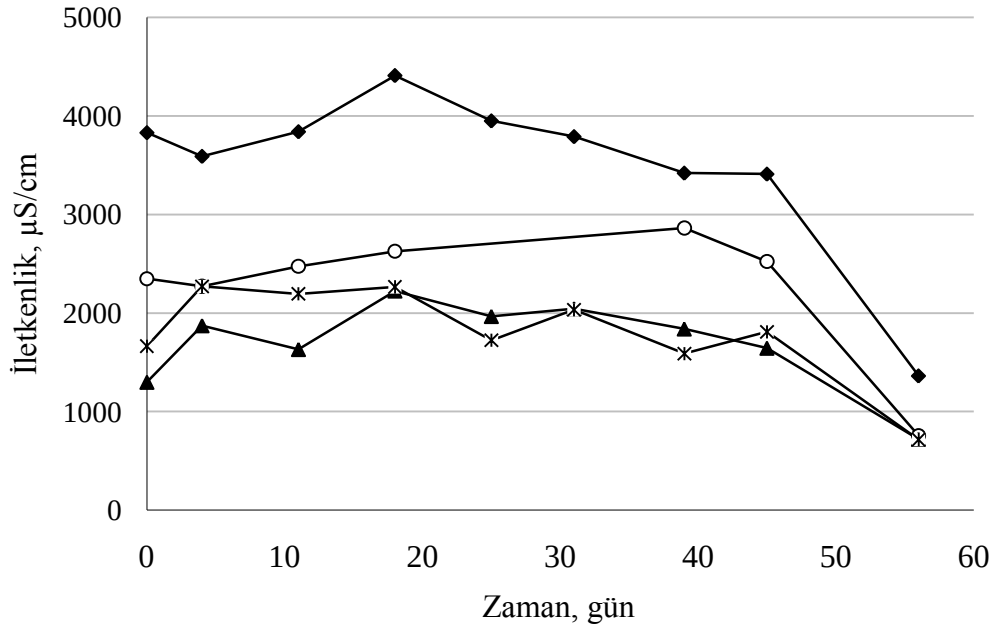
Şekil 6.19 Statik yığınlarda pH'nın zamanla değişimi.

Prekot katkılı statik yığının başlangıçta yaklaşık 4,7 olan pH değeri ilk üç haftada biyolojik ayrışma etkisiyle pH 6 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, havalandırmanın etkin sağlandığının ve aerobik mikrobiyal ayrışmanın gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Mikrobiyal aktivite için gerekli olan bu pH değerleri, proses süresince tüm yığınlarda nötr değere doğru ilerlemiş ve proses sonunda tüm yığınlar pH 6,8-7,7 aralığında kalmıştır. Bu durum, sistemin yeterli derecede havalandırıldığının, diğer bir ifadeyle anaerobik ortam koşullarının oluşmadığının bir göstergesidir.

6.3.2.3 İletkenlik

Elektriksel iletkenlik komposttaki çözünmüş tuz konsantrasyonu seviyesinin göstergesidir. İletkenlik, çözünmüş iyonların miktarı ve türü ile değişmektedir. Kompostun toprak iyileştiricisi olarak kullanılmasında, fitotoksosite potansiyelini ifade etmesi açısından iletkenlik önemli olmaktadır.

Elektriksel iletkenlik komposttaki çözülmüş tuz konsantrasyonu hakkında fikir vermesi açısından düzenli olarak ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.20 de verilmiştir.



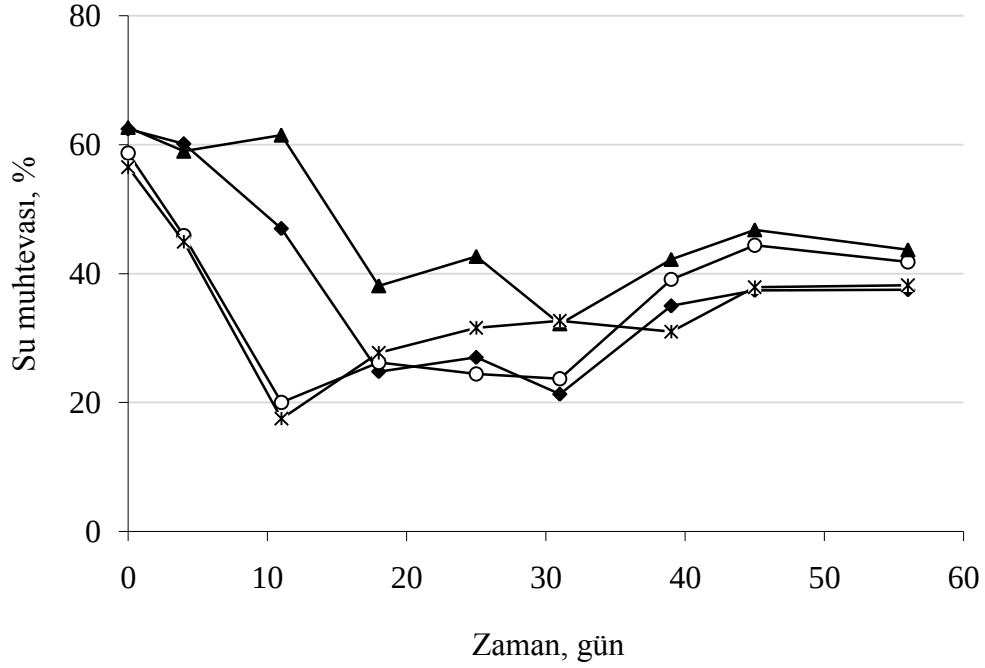
(♦: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; ○: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını);
*: Biyolojik çamur+Yonga+Organik atık yığını)

Şekil 6.20 Statik yığınlarda iletkenliğin zamanla değişimi.

Yığınlarda başlangıçtaki elektriksel iletkenlik değerleri arasında dört kat seviyesinde farklılıklar mevcuttur. Biyolojik çamur yığını 1,3mS/cm değeri ile başlangıçta en düşük iletkenlik değerine sahipken organik atık yığını yaklaşık 4mS/cm ile en yüksek değere sahiptir. Organik atık katkılı yığının başlangıç elektriksel iletkenlik değeri yaklaşık 1,6mS/cm iken prekot katkılı yığın başlangıç değeri ortalama 2,4mS/cm dir. Bu durum, prekotun yüksek iletkenlik içeriğinden kaynaklanmaktadır. Sıcaklığın yüksek olduğu prosesin ilk haftalarında organik maddenin çözünmesi ve hızlı ayrışmanın etkisiyle iletkenlik değerlerinde yükselme gözlenmiştir. Proses ilerledikçe, bütün yığınlarda iletkenlik değerleri azalmış ve proses sonunda yaklaşık 1mS/cm değerine kadar inmiştir.

6.3.2.4 Su Muhtevası

Proses başlangıcında atık yapısında mevcut olan su muhtevası, proses ilerledikçe mikrobiyal aktiviteler ile artmakta ancak havalandırma, sıcaklık artışı ve sızıntı suyunun oluşması ile de ortamdan uzaklaşmaktadır. Mikrobiyal aktivitenin gerçekleşmesi için en az %40 ve havalandırmanın etkin olarak sağlanabilmesi için ise maksimum %70 su muhtevası değerleri proses süresince muhafaza edilmelidir. Yığınlarda ölçülen su muhtevası değerleri Şekil 6.21 de verilmiştir



(♦: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; o: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını);
*: Biyolojik çamur+Yonga+Organik atık yığını)

Şekil 6.21 Statik yığınlarda su muhtevasının zamanla değişimi.

Tüm proseslerde su muhtevaları, etkin havalandırmayı olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde mikroorganizmalar için gerekli su ihtiyacını karşılayacak düzeyde tutulmaya çalışılmıştır.

Yığınlarda su muhtevası haftalık olarak kontrol edilmiş olup, su muhtevası %35-60 arasında olacak şekilde su ilavesi yapılmıştır. Hesaplanan miktardaki su ilavesi, yığınlara fiskiye ile su verilerek yapılmıştır. Son haftada yağışlar sebebi ile yığına su ilavesine gerek görülmemiştir

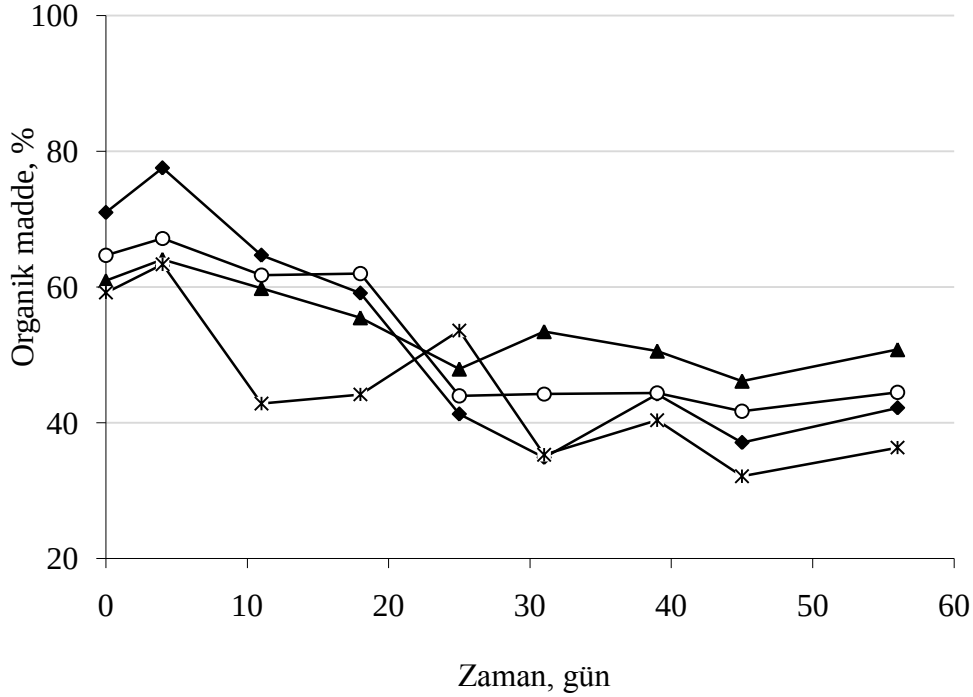
Başlangıçta yığınlarda su muhtevası % 56-63 aralığında olmuştur. Bütün yığınlarda su muhtevası ilk üç haftada düşerek %30-40 aralığına gerilemiş ve su muhtevası sekiz hafta sonunda %40 seviyelerinde kalmıştır.

Sistemden vakumla birlikte gelen su, kondens suyu tutucuda tutularak tahliye edilmiştir. İlk iki hafta su muhtevalarında artış saptanmıştır. Bu artış hızlı ayrışmanın gerçekleştiğinin ve mikrobiyal aktivite ile su üretiminin olduğunun göstergesidir.

6.3.2.5 Organik Madde

Statik yığınların tamamında organik madde (OM) değerleri zamanla azalmıştır (Şekil 6.22). Yığınlarda başlangıçta %59-71 aralığında olan OM değeri, zamanla azalarak proses sonunda %36-49 seviyelerine inmiştir. OM değeri, başlangıçta %65 seviyelerinden üçüncü hafta

sonunda %45 ve proses sonunda ise % 40 seviyelerine düşmüştür. Bu durum proses süresince OM ayrışmasının %75-80'inin yoğun (hızlı) fermentasyon (ayrışma), %20-25'inin ise yavaş ayrışma döneminde gerçekleştiğini göstermektedir.



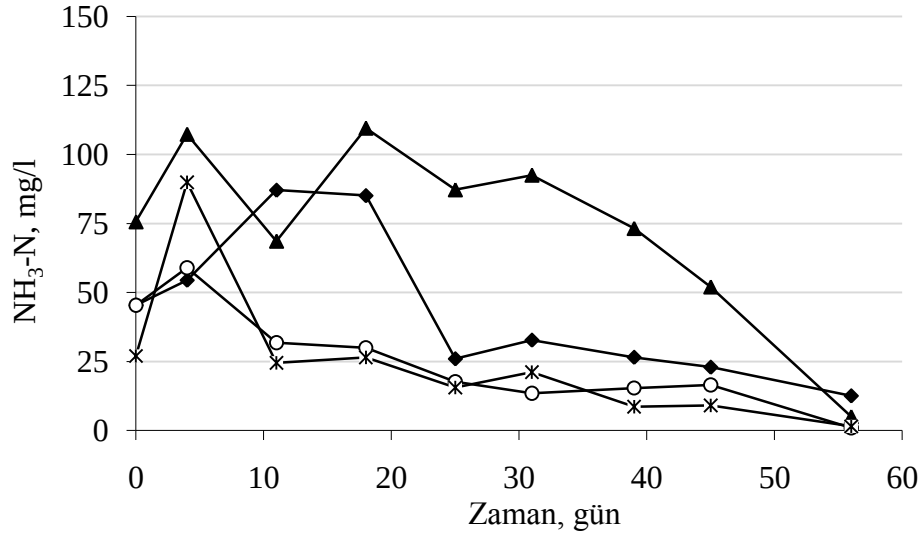
(♦: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; o: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını);
*: Biyolojik çamur+Yonga+Organik atık yığını)

Şekil 6.22 Statik yığınlarda organik maddenin zamanla değişimi.

6.3.2.6 Amonyak

Statik yığınlarda amonyağın zamanla değişimi Şekil 6.23 te verilmiştir. Başlangıçta amonyak değerleri yığınlarda %0,027 ile %0,076 aralığında ölçülmüştür. TKN değerleri dikkate alındığında, proses başlangıcında azotun tümünün organik formda olduğu kabul edilebilir.

Yığınlarda, ilk haftalarda amonyak artışı maksimum değerlere ulaşmıştır. Bunun nedeni, organik maddelerin ayrışmasının hızlı olmasıdır. Başlangıçta 25-75 mg/l seviyelerinde olan amonyak değeri, üçüncü haftadan sonra azalarak proses sonuna kadar organik atık yığını hariç 1-5 mg/l aralığına düşmüştür. Organik atık yığnında ise 12mg/l seviyesinde kalmıştır. Bu durum, yoğun fermentasyonun yaşandığı ilk üç haftadan sonra yavaş parçalanmanın ve olgunlaşmanın bir göstergesidir.

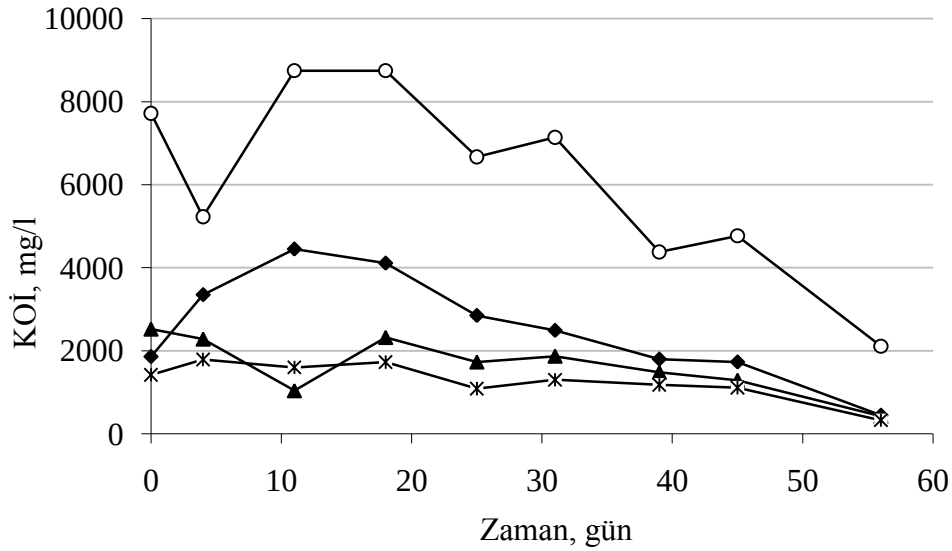


(◆: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; o: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını);
*: Biyolojik çamur+Yoga+Organik atık yığını)

Şekil 6.23 Statik yığınlar da amonyağın zamanla değişimi

6.3.2.7 Çözünmüş KOİ

Statik yığınlar da kompostlaştırma sürecinde KOİ (suda çözünen karbon) değerlerinin zamanla değişimi Şekil 6.24 te verilmiştir.



(◆: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; o: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını);
*: Biyolojik çamur+Yoga+Organik atık yığını)

Şekil 6.24 Statik yığınlar da KOİ nin zamanla değişimi.

Organik yapılı olan prekotun, çamura ilave edilmesi sonucu prekot katkılı yığında başlangıçta KOİ değeri, diğer reaktörlere oranla yaklaşık olarak 4 kat daha yüksektir. Yığınlar da,

proseste gerçekleşen ayrışmanın yaklaşık %70'inin ilk dört hafta içerisinde tamamladığı belirlenmiştir. Üçüncü haftadan sonra ayrışmanın daha yavaş olduğu gözlenmiş olup, bu durum, sıcaklık profillerine paralellik göstererek ilk üç haftanın hızlı ayrışma evresi, sonraki 5 haftanın ise yavaş ayrışma safhası olduğunu göstermektedir. Proses sonundaki KOİ değerlerine bakıldığında prekot ilave edilen yığında kısmi olarak daha yüksek KOİ gözlenirken, diğer yığınların proses sonu KOİ değerleri birbirine yakın çıkmıştır.

6.3.2.8 Havalandırma

Havalandırma, kompostlaştırmayı gerçekleştiren havalı mikroorganizmalar için gerekli olan oksijeni sağlaması, oluşan hava akımı ile mikrobiyal reaksiyonlarda üretilen karbondioksit ve suyu uzaklaştırması, ayrıca ısı transferi ile de ısıyı gidermesi açısından önemlidir.

Yüksek oksijen gereksiniminden dolayı proses başında daha fazla hava miktarı sisteme verilirken, olgunlaşma evresinde havalandırma sadece kurutma amaçlı olduğundan hava debisi azaltılmıştır. Hızlı ayrışma evresinde sistemden vakumla hava emişi yapılarak, emilen hava biyofiltreden geçirilerek koku kontrolü sağlanmıştır. Sıcaklıklar dikkate alınarak sisteme sağlanan hava miktarları ayarlanmıştır. Yığınlar 15'er dakikalık periyotlarda çalıştırılan blowerla temin edilen hava miktarları Çizelge 6.9'da verilmiştir.

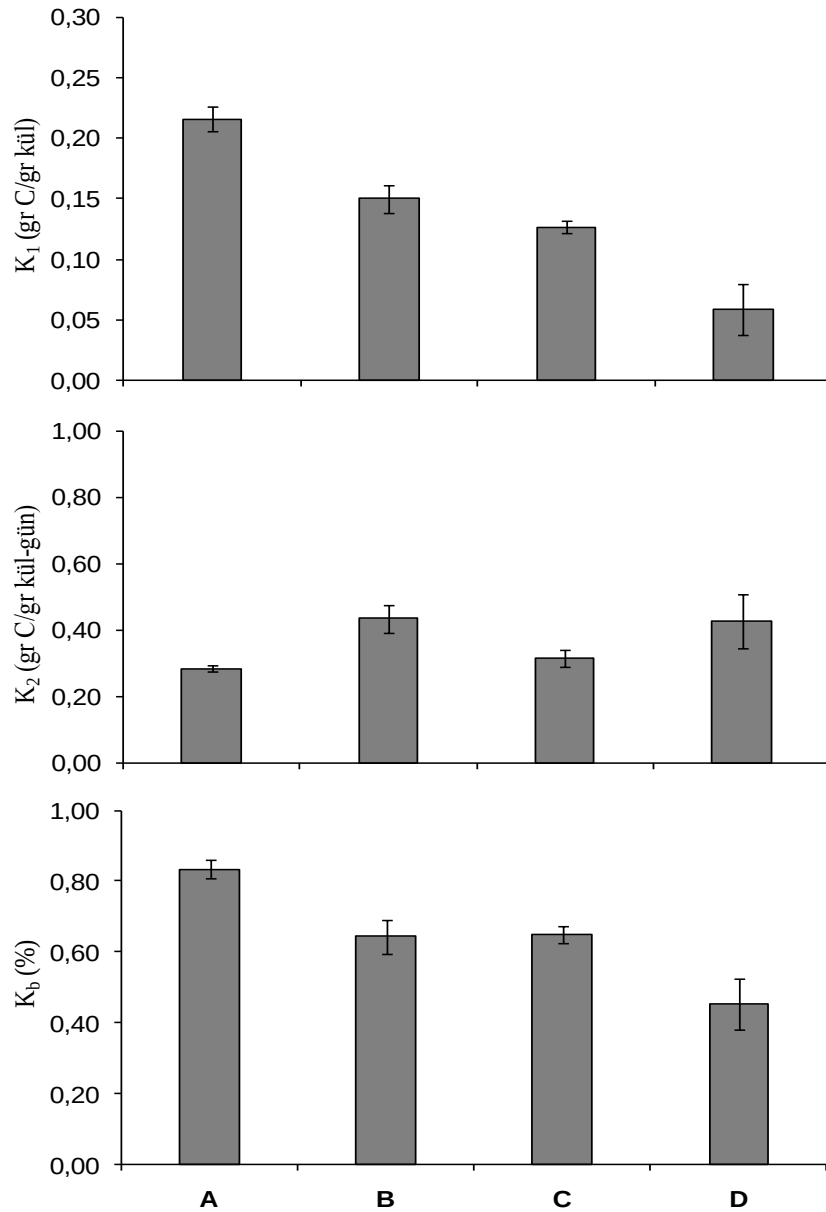
Genel olarak, kompostlaştırma süresince sisteme verilecek oksijenin 4-14 mgO₂/st-grUKM aralığında kalması tavsiye edilmektedir (Haug, 1993). Chiumenti vd.'ne (2005) göre ise gerekli hava ihtiyacı 10-100 m³/saat.ton atık aralığında değişmektedir. Van der Heide ve Eisma'ya (1997) göre de pratikteki gerçek hava ihtiyacı 2-5 m³/m³.saat aralığında değişmektedir. Statik yığınlar temin edilen hava miktarları dikkate alındığında tavsiye edilen aralıkta kaldığı görülmektedir.

Çizelge 6.9 Statik yığınlar verilen hava miktarları.

Yığın No	İçeriği	Hacimsel oran	Toplam yığın hacmi (m ³)	Verilen hava miktarı (m ³ / m ³ saat)
1	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Prekot karışımı	2 / 0,5 / 0,5	26	4,5
2	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru	2 / 1	26	4,5
3	Yonga / Biyolojik arıtma çamuru / Organik evsel katı atık karışımı	2 / 0,5 / 0,5	26	4,5
4	Organik evsel katı atık	1	26	4,5

6.3.3 Statik Yığın Kompostlaştırmada Karbon Kaybı Üzerinden Kompost Kinetiği

Statik yığınlar da gerçekleşen kompostlaştırma sürecinde organik madde içeriği, tüm karışımlar için azalma eğilimindedir. Kompostlaştırma süreci normal devam etmiş ve 8 haftalık kompostlaştırma sürecinde biyoayrışabilirlik %45 ile %83 arasında değişmiştir. Biyoayrışabilirliği ifade eden K_b değeri, organik atık yığını için (A) %83 le maksimum olmuştur. İlave karbon kaynağı olarak kullanılan prekot katkılı yığın (B) da ise K_b değeri %64 olarak gerçekleşmiştir. Statik yığınlar da yapılan çalışmada elde edilen sonuçlardan hesaplanan kinetik katsayılar Şekil 6.25 te verilmiştir.



(A: Organik atık yığını; B: Biyolojik çamur/yonga/prekot yığını; C: Biyolojik çamur/yonga/organik atık yığını; D: Biyolojik çamur /yonga yığını)

Şekil 6.25 Statik yığın kompostlaştırma sürecinde yığınlar için kinetik katsayılar.

Kinetik katsayılarından K_1 değeri, substratın enzime olan kimyasal ilgisi ile ters orantılıdır. K_1 değerleri tüm yığınlarda <1 olarak gerçekleşmiş ve 0,018 değeri ile prekot karışımlı yığın en düşük K_1 değerine sahiptir. Bu değer düşük (<1) kullanılan substratın enzimlere olan ilgisinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

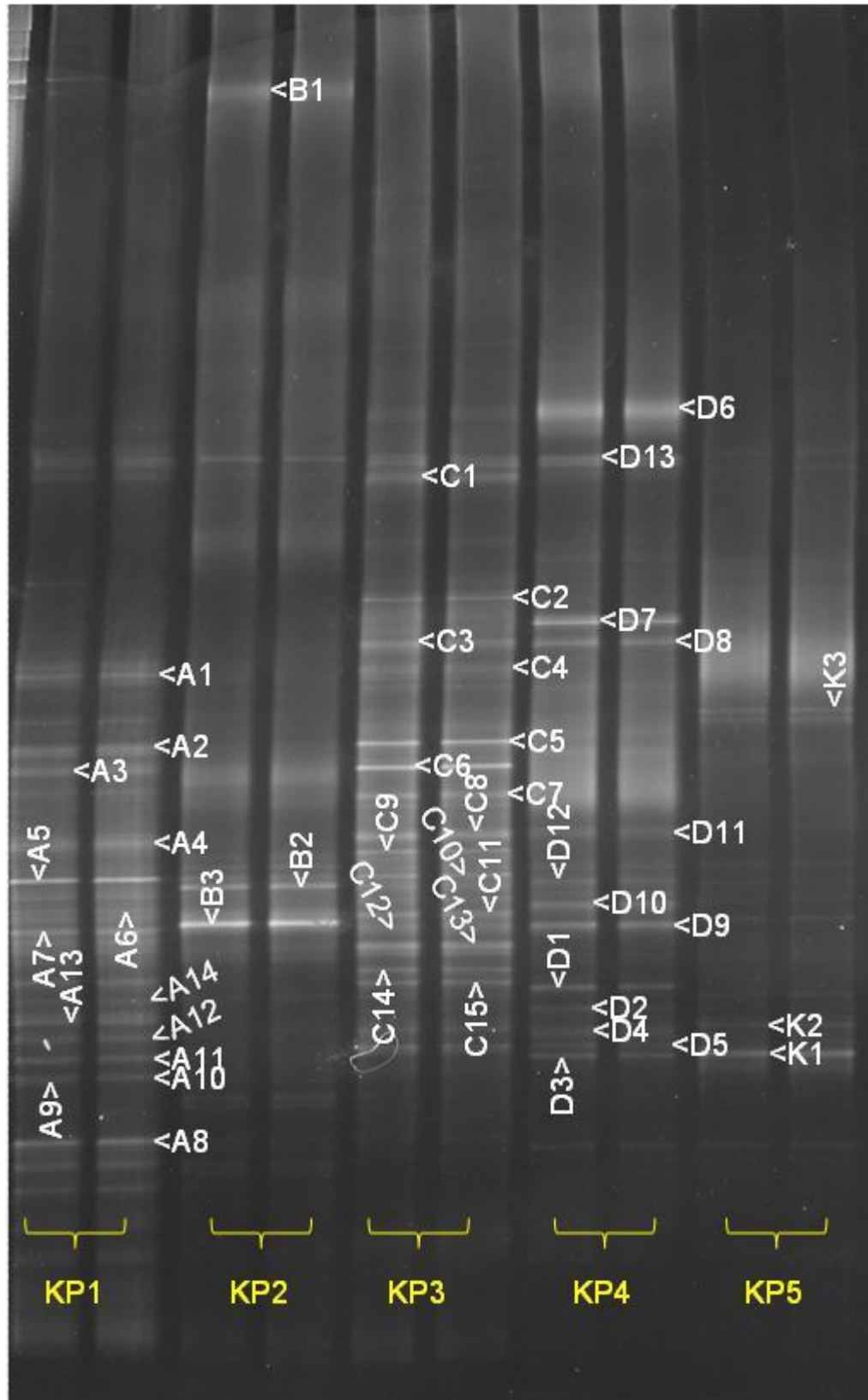
K_2 değeri, kompostlaştırma sürecinin sıcaklık, nem, havalandırma ve kimyasal koşullar gibi işletme parametrelerine bağlıdır. Kompostlaştırma sürecinde çevre şartları, tüm karışımlar için aynıdır. K_2 değerinin düşük olması sebebiyle, kompostlaştırma sürecinde çevre şartlarının bu çalışmada sınırlayıcı faktör olmadığı söylenebilir.

Organik bileşiklerin kompozisyonu ve parçalanma oranları kompost süresince enerji dengesini etkileyen temel faktörlerdir. Ham çamurun parçalanabilme oranı %70-80 arasındadır. Çürütülmüş çamur içinse bu oran %35-55 mertebelerindedir (Haug 1993).

Yığınlarda kullanılan evsel atıksu biyolojik arıtma çamuru ile prekot susuzlaştırma ünitelerinden sonraki çamurlardır. Bu çamurlar kullanılarak gerçekleştirilen statik yığın kompostlaştırma prosesinde elde edilen biyoayrışabilirlik (K_b) değerlerinin prekot ve organik atık katkılı yığınlarda çamur yığınının göre oldukça yüksek ve tavsiye edilen aralıklarda gerçekleşmiştir.

6.3.4 Statik Yığın Kompostlaştırma Sürecinde Etkin Mikrobiyal Türler

Yığın kompostlaştırma sürecinde etkin olan türler, PCR (Polimeraz zincir reaksiyonu), DGGE (Denature gradyan jel elektroforezi) ve dizi analizi temelli moleküller tekniklerle belirlenmiştir. Şekil 6.26 da Denature Gradyan Jel Elektroforezi (DGGE) ve sekans analizi için kesilen bantların görüntüsü yer almaktadır. Kesilen bantların sekans analizi ile elde edilen kromatogramları ve baz dizilimleri ile elde edilen sonuçlar Çizelge 6.10 da verilmiştir. Elde edilen sonuçlarla bu süreçte sıcaklık değişimlerine paralel olarak mikrobiyal popülasyonun değişim gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 6.26 da verilen A2 no'lu bantın *Paenibacillus residui* türüne ait olduğu yapılan sekans analizi ile tespit edilmiştir. Bu tür evsel katı atık kompostundan izole edilen bir tür olup, türün optimum gelişme şartları 37 °C ve pH=7'dir. Söz konusu tür 25-50 °C sıcaklıkta ve pH 7.0-9.0 aralıklarında faaliyetini sürdürmektedir (Vaz-Moreira, vd., 2009). A3 no'lu bant *Ochrobactrum sp.* türünü temsil etmektedir ve literatürdeki muhtelif çalışmalarda kompostlaştırma prosesinde rol alan 0-42°C sıcaklıklarda, pH 6.0–9.0 aralıklarında faaliyet gösteren aerobik bir türdür (Dürr, vd., 2006).



KP1: Arıtma çamuru/Yonga/ Organik Atık yığını_31 °C, KP2: Arıtma çamuru/Yonga/Prekot yığını_45 °C, KP3: Arıtma çamuru / Yonga yığını_31 °C, KP4: Organik Atık yığını_65 °C, KP5: İBB Kısırmandıra Kompost ve Geri Kazanım Tesisi_65 °C. (bütün numuneler ikinci haftanın sonunda alınmıştır.)

Şekil 6.26 Denature gradyan jel elektroforez görüntüsü ve bantlar.

Çizelge 6.10 DGGE jelinden kesilen bandların sekans sonuçları.

Bant (Şekil 6.26)	Mikrobiyal Tür	Benzerlik (%)	Bant (Şekil 6.26)	Mikrobiyal Tür	Benzerlik (%)
A1	-	-	C8	<i>Brevundimonas sp.</i>	%100
A2	<i>Paenibacillus residui</i>	%100	C9	-	-
A3	<i>Ochrobactrum sp.</i>	%98	C10	<i>Pseudoxanthomonas taiwanensis</i>	%97
A4	<i>Bacillus sp.</i>	%97	C11	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	%98
A5	<i>Pseudoxanthomonas taiwanensis</i>	%99	C12	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	%100
A6	<i>Bacillus sp.</i>	%97	C13	-	-
A7	<i>Bordetella petrii</i>	%100	C14	<i>C. Microthrix parvicella</i>	%100
A8	<i>Uncultured compost bacterium</i>	%94	C15	<i>Gordonia defluvii</i>	%100
A9	<i>Uncultured compost bacterium</i>	%96	D1	<i>Brachybacterium sp.</i>	%100
A10	<i>Uncultured compost bacterium</i>	%98	D2	<i>Cellulomonas cellulans</i>	%98
A11	<i>Chelativorans multitrophicus</i>	%99	D3	<i>Uncultured compost bacterium</i>	%98
A12	<i>Halomonas nitroreducens EF613114</i>	%95	D4	<i>Corynebacterium sp.</i>	%100
A13	<i>Uncultured bacterium</i>	-	D5	<i>Arthrobacter sp.</i>	%99
A14	<i>Bordetella petrii</i>	%97	D6	-	-
B1	<i>Amylomyces rouxii</i>	%99	D7	<i>Sphingobacterium composti</i>	%100
B2	<i>Bacillaceae bacterium</i>	%99	D8	<i>Sphingobacterium composti</i>	%100
B3	<i>Bacillus coagulans</i>	%98	D9	<i>Planococcus sp.</i>	%98
C1	-	-	D10	<i>Caryophanon sp.</i>	%97
C2	<i>Clostridium tetani</i>	%96	D11	<i>Staphylococcus sp.</i>	%100
C3	<i>Acinetobacter sp.</i>	%98	D12	<i>Bacillus sp.</i>	%96
C4	<i>Acinetobacter sp.</i>	%97	D13	<i>Enterococcus sp.</i>	%98
C5	<i>Pseudomonas sp.</i>	%98	K1	<i>Corynebacterium sp.</i>	%97
C6	<i>Comamonas denitrificans</i>	%94	K2	<i>Symbiobacterium thermophilum</i>	%98
C7	-	-	K3	<i>Pediococcus acidilactici</i>	%100

Bacillus türü organizmalar polimer parçalayıcı amilaz, selüloz, proteaz gibi enzimleri salgılaması sebebiyle kompostlaştırma sürecinin önemli mikrobiyal topluluklarındandır. *Basillus* türü organizmaların en belirgin özelliği sıcak ve kuru ortamlara dayanıklı ve besi maddesi sınırlı koşullarda uzun süre kalmasına müsade eden dayanıklı sporlar üretmesidir. Bu

çalışmada A4, A6, B3 ve D12 bantlarıyla *Bacillus sp*, *Bacillus coagulans* kompostlaştırma sürecinin değişik kademelerinde rol alarak bu özelliği ile ön plana çıkmıştır. A5 no'lu bantla temsil edilen *Pseudoxanthomonas taiwanensis* termofilik fakültatif bakteri sınıfında olup yüksek oranda selüloz içeren atıkların ayrışmasında rol almaktadır (Kato, vd., 2004). A8, A9 ve A10 no'lu bantlar kompost organizmaları olup bu türe yakın bir tür sekans sonuçlarından belirlenememiştir (Uncultured compost bacterium).

B1 no'lu bant *Amylomyces rouxii* mantar sınıfında bir organizmadır. Kompostlaştırma prosesinde mezofilik bakterilerle birlikte aktinomisetler, mantarlar ve mayalar, yağları, proteinleri ve karbonhidratları ayrıştırırlar. Bu çalışmada kompostlaştırma sürecinde yer alan bir mantar türü olarak *Amylomyces rouxii* biyolojik ayrışma sürecinde rol almıştır.

Kompostlaştırma sürecinde aktif rol alan mikrobiyal gruplar uzun yıllardan beri birçok çalışmaya konu olmuştur (Finstein and Morris, 1975). Son olarak Ryckeboer v.d. (2003) kompostlaştırma sürecinde sıcaklığa dayalı tür değişimi ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Söz konusu çalışmada, *Bacillaceae* türünün mezofilik fazda komposttan izole edilen türler arasında olduğu vurgulanmıştır. Bu tür, kompostlaştırma sürecinin başında mezofilik fazda asidik ortamda rol alan bir tür olduğu söz konusu çalışmada vurgulanmıştır. B2 no'lu bant *Bacillaceae bacterium* türüne karşılık gelen ve bu çalışmada organik atıkların ayrışma sürecinde rol alan tür sınıfında yerini almıştır.

Clostridium tetani literatürde birçok çalışmada verilen ve kompostlaştırma sürecinde rol alan organizmadır (Ingrid, v.d., 2005). Statik yığın çalışmasında C2 no'lu bant *Clostridium tetani* türüne karşılık gelmektedir. Aynı çalışmada kompostlaştırma sürecinde rol alan bir başka türün *Acinetobacter sp.* türü olduğu vurgulanmış, bu çalışmada ise C3 ve C4 no'lu bantlarla *Acinetobacter sp.* türünün bu süreçteki varlığı doğrulanmıştır. Bu tür topraktaki aromatik hidrokarbonların mineralizasyonunda rol alan önemli türler arasında yer almaktadır. Kompostlaştırma sürecinde rol alan bu tür kompostun kirlenmiş toprakların biyolojik yollarla ıslahında kullanılabileceğinden kompostun bu amaçla kullanımı söz konusu olabilir.

C5 no'lu bant *Pseudomonas sp.* türünü temsil etmektedir. Arıtma çamurlarının kompostlaştırıldığı bu çalışmada arıtma çamurunda yer alan bir tür de atıkların ayrışması esnasında rol alan türler arasında yerini almıştır. Benzer şekilde *Comamonas denitrificans* türü de aktif çamurda denitrifikasyon sürecinde rol alan önemli türler arasındadır (Gumaelius et al., 2001).

Arazi ölçekli organik atık kompostlaştırma sistemi ile gerçekleştirilen atığın ayrışması esnasında mikrobiyal populasyonun değişiminin denature gradyan jel elektroforezi ile

araştırıldığı bir çalışmada, *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Clostridium sp.*, *Staphylococcus sp.* ve *Brevundimonas sp.* türlerinin kompostlaştırma sürecinde etkin rol aldıkları belirlenmiştir (Pedro, v.d., 2001).

Brevundimonas sp. türü kompostlaştırma sürecinde son aşamada rol alan türlerdendir. *Propionibacterium sp.*, *Methylobacterium sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Bradyrhizobium sp.* ve farklı *Bacillus* türleri kompostlaştırma sürecinde proses bitene kadar hem mezofilik kademede hem de termofilik kademede varlıklarını sürdürmektedirler (Pedro, v.d., 2001). Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarda bu durumu doğrulamaktadır. Bu çalışmada da bulgular arasında yer alan (C2 nolu bant) *Clostridium* kompostlaştırma sürecinin ilk mezofilik kademesinde rol alan türlerdendir. C10 no'lu bant ile temsil edilen *Pseudoxanthomonas taiwanensis* aerobik termofilik bir türdür. Bu türün optimum çalışma sıcaklığı 55 °C'dir (Zitomer, v.d., 2007). Zitomer, v.d., (2007) bu türün kompostlaştırma sürecindeki varlığında *Bacillus* türlerinin de sistemde bulunmasının beklendiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada *Bacillus* türlerinin kompostlaştırma sürecinin her kademesinde varlığı bu durumu doğrulamaktadır.

C14 no'lu bant arıtma çamurlarında bulunan filamentli organizma türlerinden olan ve çamurun çökme kabiliyeti üzerinde önemli organizmalardan *C. Microthrix parvicella* türünü temsil etmektedir. *Microthrix* ve C15 no'lu bantla temsil edilen *Gordonia* grubu filamentli türler yağların hidrolizinde rol almaktadırlar. Bu türler lipaz ve esteraz enzimleri yardımıyla yağların hidrolizinde ön plana çıkmaktadır (Nielsen, 2010). Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla kompostlaştırma sürecinde DGGE bantları ile var oldukları ispatlanan bu türler kompostlaştırma sürecinde zor ayrışan yağların hidrolizinde görev aldıkları söylenebilir.

Horisawa, v.d., (2008) tarafından Japon sediri yongası ve çöp karışımı ile gerçekleştirilen çalışmada kompostlaştırmada baskın olan türlerin, *Acinetobacter*, *Alcaligenes sp.*, *Arthrobacter sp.*, *Bacillus sp.*, *Brachybacterium sp.*, *Brevundimonas vesicularis*, *Cellulomonas cellulans*, *Paenibacillus sp.*, *Staphylococcus sp.*, *Stenotrophomonas maltophilia* olduğu belirlenmiştir. Çalışmada katkı malzemesi olarak yonga kullanılması bu çalışma ile benzerlik göstermektedir. Her iki çalışmanın da tür profilleri incelendiğinde benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmada tespit edilen türler ve parantez içerisinde verilen Şekil 6.26 deki bant numaraları; *Acinetobacter* (C3 ve C4), *Arthrobacter sp.* (D5), *Bacillus sp.* (A6, B2, B3, D12), *Brachybacterium sp.* (D1), *Brevundimonas sp.* (C8), *Cellulomonas cellulans* (D2), *Paenibacillus sp.* (A2), *Stenotrophomonas sp.* (C11, C12) şeklindedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların literatürde verilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu ve kompostlaştırma sürecinin optimum şartlarda gerçekleştiği görülmektedir.

6.3.5 Statik Yığın Nihai Ürün Özellikleri

Statik yığın malzemesi 8 haftalık kompostlaştırma sürecinden sonra 15 mm elekten elenerek elek altı olarak nihai kompost ürünü elde edilmiştir. Elde edilen ürünler koyu kahverenginde olup ürünlere ait resimler Şekil 6.27 de verilmiştir.



(OA: Organik atık yığını ürünü; BÇ/Y/P: Biyolojik çamur/yonga/prekot yığını ürünü; OA/BÇ/Y: Biyolojik çamur/yonga/organik atık yığını ürünü; BÇ/Y: Biyolojik çamur/yonga yığını ürünü)

Şekil 6.27 Statik yığınlardan elde edilen kompost ürünlerine ait resimler.

Statik yığın çalışması sonucu elde edilen ürünlerde yapılan analizler ve organik atık yığınının mukayesesi amacıyla, organik atık temin edilen İBB kompost tesisinde üretilen eş dönemli kompost ürünü analiz sonuçları Çizelge 6.11 de verilmiştir.

Statik yığın çalışmalarında elde edilen kompost ürünlerinin pH sı bütün yığınlar için nötr seviyeye yakın olarak pH 6,95-7,7 arasında değişmiştir. Elde edilen ürünlerin pH değerleri 6,0-8,0 aralığında olduğundan, ürünlerin toprağa uygulanmasında topraklarda pH değerleri açısından bir problem oluşturmayacağı söylenebilir.

Elektriksel iletkenlik kompostun çözünebilir tuz içeriğini göstermektedir. Yığınlarda iletkenlik değerleri başlangıçta 1300-3800 μ S/cm aralığında değişirken elde edilen ürünlerde 1020 ile 3200 μ S/cm aralığında değişmiştir. Organik atık yığın ürünü en yüksek iletkenlik değerine (3210 μ S/cm) sahiptir.

Kompost ürününün birim hacim ağırlığının, taşıma ve kullanım kolaylığı ile toprağa faydasının belirlenmesi açısından su muhtevası önemlidir. Bu nedenle, ürün kullanımının kolaylığı için su muhtevası minimum %30, maksimum %50 olmalıdır. Elde edilen ürünlerde su muhtevası %37-44 aralığında kalmış olup bu değerler tavsiye edilen aralıktadır.

Çizelge 6.11 Statik yığın kompost ve İBB kompost tesisi ürün analizleri.

Parametre	OA	BÇ/Y/P	BÇ/Y/OA	BÇ/Y	İBB
pH	7,62	6,95	7,7	7,23	7,58
İletkenlik ($\mu\text{S/cm}$)	3210	1569	1020	1068	4090
Su muhtevası (%)	37,3	41,8	38,2	43,7	22,8
Organik madde (%)	36,5	42,235	37,855	49,42	36,48
C (%)	20,94	21,4	18,38	23,59	19,18
N (%)	1,67	2,14	1,46	1,56	1,4
C / N	12,49	10,00	12,59	15,12	13,70
TKN (mg/l)	1032	1599	1306	1479	317
NH ₃ -N (mg/l)	13	1	2	5	52
KOİ (mg/l)	1135	2298	652	903	2038
Cd (mg/kg)	3,28	3,026	4,26	2,42	5,6135
Cr (mg/kg)	52,09	197,08	146,58	297,88	61,04
Cu (mg/kg)	99,5	139,3	149,89	244,1	194,3
Pb (mg/kg)	120,5	44,6	41,6	73,2	134,3
Ni (mg/kg)	38,22	59,72	59,49	94,74	30,74
Hg (mg/kg)	0,87	0,56	0,49	1,02	0,48
Zn (mg/kg)	441,00	611,58	770,07	1001,44	400,76
Top P (g/kg)	2,823	9,931	2,943	6,389	1,167
Yoğunluk (kg/L)	0,631	0,52	0,5831	0,525	0,68

(OA: Organik atık yığını; BÇ/Y/P: Biyolojik çamur/yonga/prekot yığını; BÇ/Y/OA: Biyolojik çamur/yonga/organik atık yığını; BÇ/Y: Biyolojik çamur /yonga yığını; İBB: İBB Kompost tesisi ürün)

Organik madde (OM) önemli toprak bileşenlerindendir. Su tutma kapasitesi, toprak yapısı ve besin maddesi alımında önemli rol oynamaktadır. Ürünün organik madde içeriğinin en fazla %40 olması tavsiye edilmektedir. Yığınlardan elde edilen ürünlerde OM değeri %36-49 aralığında değişmiştir. Prekot katkılı ve organik atık katkılı yığınlar ile organik evsel atık yığını düşük OM seviyelerine ulaşırken (%37-41), en yüksek OM seviyesi (%49) katkı malzemesi kullanılmayan çamur yığnında gerçekleşmiştir. Bu sonuçtan katkısız yığnında biyolojik parçalanmanın daha düşük seviyede gerçekleştiği söylenebilir.

C/N oranında karbon ve azot parametreleri toplam konsantrasyon olarak alınmaktadır. Toplam karbon, organik maddenin (biyolojik olarak ayrışabilen uçucu katıların) karbon kısmını, toplam azot ise organik azot ile amonyak (NH₄⁺-N) ve nitrat (NO₃⁻-N) azotlarının ağırlıklı olduğu inorganik azotu içermektedir. Kontrollü şartlar altında işletilen tesislerde

atığın C/N oranı stabilitenin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Üründeki C/N değerlerinin toprak kalitesini bozmaması açısından 20'nin altında olması tavsiye edilmektedir. Statik yığın çalışmalarında elde edilen ürün C/N oranları 10-15 arasında değişmekte olup tavsiye edilen aralıkta kaldığı görülmektedir. Prekot katkılı yığın C/N değeri 10 olarak gerçekleşmiş ve organik atık katkılı yığın ile katkısız yığınlara göre daha stabil bir C/N değerine ulaşmıştır.

Kompost ürününde amonyak miktarının genelde 0.5 gr/kg değerinin altında olması istenir, aksi halde tarım uygulamalarında bitkilerde toksik etkileri gözlenebilir (Altınbaş, 2000). Statik yığınlardan elde edilen ürünlerde amonyak değerleri 0,01-0,13g/kg (1-13mg/l) aralığında değişmiş olup tavsiye edilen değerleri gerçeklemiştir. En düşük amonyak değeri prekot katkılı yığın ürününde tespit edilmiştir.

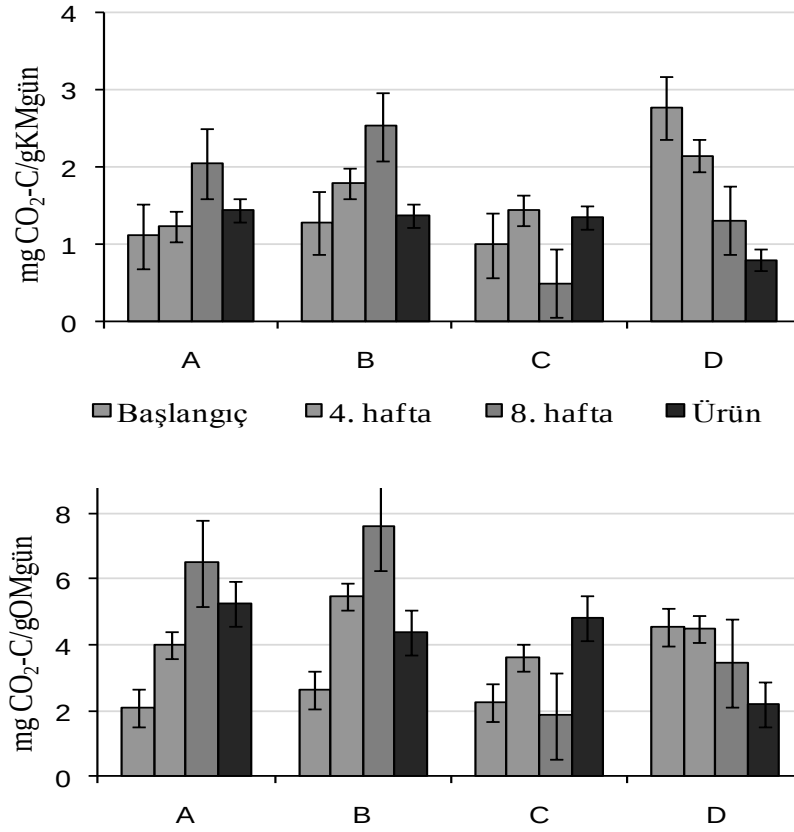
Suda çözünen karbon miktarı (KOI) olgunluk seviyesini göstermesi açısından önemlidir. Üründeki suda çözünen karbon miktarı proses içinde ayrıştırılmayan hümkik asitlerden kaynaklanmaktadır. Başlangıçta yığın karışımlarında 1420-7720mg/l aralığında olan çözünmüş KOI değerleri elde edilen ürünlerde 652-2298mg/l aralığında değişmektedir. Ürünlerde en yüksek KOI değeri prekot katkılı yığına aittir. Bu durum prekotun organik yapısının etkisinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla biyolojik çamurların prekot katkısı ile kompostlaştırma sonucunda elde edilecek kompost ürününe KOI değeri çamurun tek başına veya organik atık katkısı ile kompostlaştırılmasıyla oluşacak ürün KOI değerlerinden yüksek olacağı beklenmelidir.

Biyolojik parçalanmayla oluşan fermentasyon kaybı dolayısıyla, başlangıçtaki miktarlara mukayese edildiğinde ürün kuru madde miktarındaki ağır metal konsantrasyonları artmaktadır. Kompost ürününün toprakta kullanımında müsaade edilen ağır metal sınır değerleri reaktör çalışmaları bölümünde Çizelge 6.4 te verilmiş olup statik yığınlardan elde edilen kompost ürünlerindeki ağır metal konsantrasyonlarının çizelgedeki sınır değerlerle mukayesesi aşağıda açıklanmıştır. Yığın ürünlerinde Cd, 2,42-4,26mg/kg aralığında değişmekte olup TKB OGT hariç bütün sınır değerlerin altında kalmaktadır. Cr, 52-297mg/kg aralığında değişmekte olup EKAÇTKY ve ABD sınır değerlerini sağlamaktadır. Ni konsantrasyonu 38-94mg/kg aralığında olup EU 488 98 hariç bütün sınır değerlerin altındadır. Organik atık yığını dışındaki yığınların Pb konsantrasyonları bütün sınırların altında kalmıştır. Organik atık yığını Pb değeri ise (120,5) EU 488 98 hariç bütün sınır değerlerin altındadır. Cu konsantrasyonu 99-244 mg/kg aralığında olup, sadece EU 488 98 limitini sağlamazken diğer bütün limit değerleri sağlamaktadır. Yığınlardan elde edilen ürünlerde Zn konsantrasyonu 441-1001mg/kg arasında değişmekte olup, EU 488 98 hariç bütün sınır değerlerin altındadır.

Cd/Zn oranı, kadmiyumun canlıların bünyesine geçme riskini tahmin etmek amacıyla kullanılır. Kompost ürününün doğaya bırakılmasından itibaren içerisindeki kadmiyum besin zinciri ile dokularda birikebilir. Cd'nin biyolojik olarak kullanımı ve topraktan bitkiye geçerek insanlara ulaşması oldukça kompleks bir süreçtir. Kullanılan kompost ürünü ve dolayısı ile bitkilerdeki Cd/Zn oranı doğal ortam seviyesine eşdeğer olan 0,01'den az olduğunda canlıların dokusundaki Cd miktarı yükselmemektedir. Türkiye dahil dünyanın pek çok ülkesinde olduğu gibi özellikle çinko fakiri topraklarda uygulama yapılacaksa kompostun toprağa Zn sağlaması bakımından Zn konsantrasyonu büyük öneme sahiptir. Statik yığın denemesinde elde edilen kompost ürünlerinde Cd/Zn oranları 0.002-0,0074 aralığında değişmiştir.

Statik yığın çalışmasında bir adet organik atık yığını sistemin performansını ölçebilmek amacıyla kontrol amaçlı oluşturulmuştur. Organik atık yığını hem sistemin çalışma veriminin ölçülebilmesinde bir referans olmuş hem de bu yığından elde edilen ürün kalitesi, yığınlara beslenen organik atığın temin edildiği İBB kompost tesisinde aynı organik atıktan elde edilen ürün kalitesi ile mukayese imkanı vermiştir. İBB kompost tesisi ile statik organik atık yığınının elde edilen kompost ürününe ait analizler Çizelge 6.11 de verilmiştir. Her iki prosese ait ürünlerin pH'ları 7,6 seviyesindedir. Elektriksel iletkenlik değeri tesis ürününde $4090\mu\text{S}/\text{cm}$ iken yığın ürününde $3210\mu\text{S}/\text{cm}$ dir. Tesis ürününün su muhtevası %23 iken, yığın ürününde bu değer prosesin son günlerindeki yağışın da etkisiyle %37 dir. Su muhtevasının %30 un altında olduğu durumlarda üründe tozutma sözkonusu olduğundan düşük nem içeriği tercih edilmemektedir. Organik madde miktarı hem tesis ürününde hem de statik organik yığın ürününde %36,5 olarak gerçekleşmiştir. C/N oranı tesis ürününde 13,7 iken yığın ürününde 12,5 dir. Suda çözünen karbon miktarı tesis ürününde 2038 mg/l iken yığından elde edilen üründe 1135mg/l dir. Yukarıda açıklanan parametreler ve ağır metal konsantrasyonları dikkate alınarak yığın metodu ile tesiste uygulanan kapalı sistem ürün kalitesi açısından değerlendirildiğinde iyi bir paralellik olduğu görülmüştür. Bu durumda, yığın metodu ile proses için gerekli havanın ve kompostlaştırma şartlarının sağlanabildiği tespit edilmiştir. Ancak, açık havada uygulandığı takdirde yığın metodunun hava şartlarından etkilendiği özellikle yağış ile su muhtevalarının arttığı saptanmıştır. Bu durumda yığınların üzerinin örtülmesinin su muhtevasının ve koku kontrolü açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

Statik yığın kompostlaştırma çalışmasında yürütülen respirometre deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 6.28 de verilmiştir.



(A: Organik Atık Yığını; B: Biyolojik çamur/yonga /prekot yığını; C: Biyolojik çamur/yonga /organik atık yığını; D: Biyolojik çamur /yonga yığını)

Şekil 6.28 Statik yığın denemesi respirometre sonuçları.

Statik yığın denemesinde elde edilen ürünlerin respirometre sonuçları 0,8-1,4 $\text{mg CO}_2\text{-C/gKMgün}$ aralığında kalmaktadır. Bu değerler Çizelge 6.12 de verilen değerlerle mukayese edildiğinde, yığın ürünlerinin tamamı Dewar olgunluk sınıfı V seviyesinde olgun (stabil) kompost ürünü oldukları görülmektedir. Çizelge 6.12 de verilen derecelendirme, Woods End bilimadamları tarafından binlerce kompostun incelenmesiyle geliştirilmiş olup 1980' den beri kullanılmaktadır.

Çizelge 6.12 CO_2 tüketiminin Dewar kendiliğinden ısınma testi ile ilişkisi ve denklik dereceleri.

$\text{mg CO}_2\text{-C/g KM gün}$	$\text{mg CO}_2\text{-C/g OM gün}$	Solunum derecesi	Dewar olgunluk sınıfına denklik
0-6	0-4	Çok düşük oran	V
6-25	4-16	Kısmen düşük oran	IV-III
25-46	16-30	Orta seviye oran	II-I
46-77	30-50	Orta-yüksek oran	I
> 77	> 50	Yüksek oran	

Dewar indisi, 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 dayanır. Test sonuçlarının yorumlanması, kompost sıcaklıklarının her 10°C'lik artışına karşılık gelen beş seviyeye ayrılarak yapılmaktadır. Buna göre Sınıf I ortam sıcaklığı ile Dewar kabı içindeki en yüksek sıcaklık farkının 0-10°C aralığında olduğunu gösterirken, Sınıf V ise 40-50°C aralığında olduğunu göstermektedir .

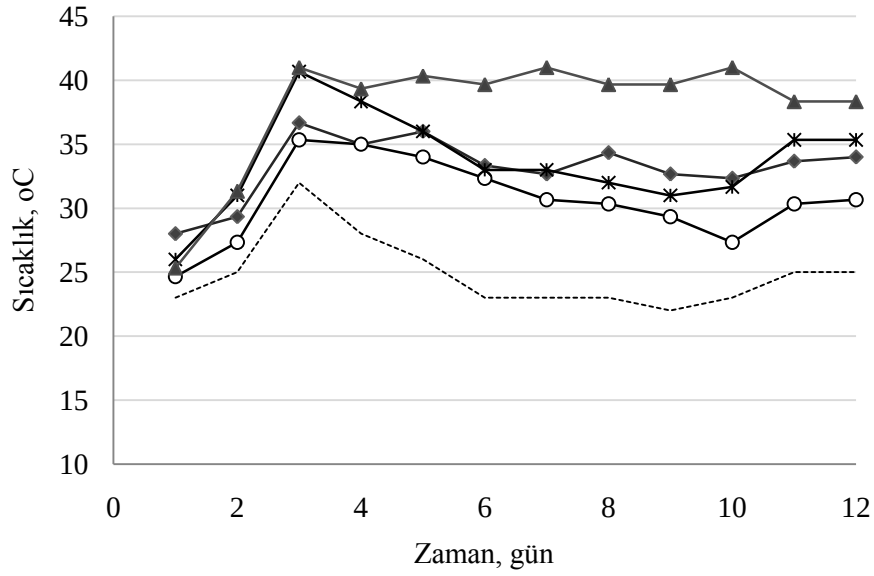
Dewar testi sonucunda elde edilen en yüksek sıcaklık farkı verisi, pratikte Çizelge 6.13 te verildiği gibi beş kategoride gruplandırılmaktadır. Ancak bazı Avrupalı kuruluşlar bu gruplandırmayı taze kompost (sınıf I), aktif kompost (sınıf II ve III) ve bitmiş kompost (sınıf IV ve V) olmak üzere üç kategoride de yapmaktadır (TMECC, 2001).

Çizelge 6.13 Dewar ısınma testi stabilite sınıflandırması.

Ortam ile Dewar kabı içerisindeki sıcaklık farkı	Stabilite sınıfı	Olgunluk tanımı
<10°C	V	Bitmiş kompost, çok stabil
10-20°C	IV	Olgunlaşan kompost, orta stabil
20-30°C	III	Aktif kompost, ayrışan ve stabil olmayan
30-40°C	II	Olgunlaşmamış kompost, çok aktif kompost
>40°C	I	Ham atık, Taze kompost

Bazen Dewar testinde alışılmadık şekilde kabın içerisindeki sıcaklık bir hafta veya daha uzun bir süre sonra da artabilir. Böyle aykırı numunelerin yorumlanmasında dikkatli olunmalıdır. Isı veya yüksek su muhtevasından zarar görerek kompostlaştırma prosesinden çıkan numuneler yukarıdaki tanıma uyarak ilk başta çok stabilmiş gibi görünürler ancak ortam şartlarının uygun hale gelmesiyle mikroflora tekrar aktif hale gelir ve yüksek sıcaklık artışları gözlenebilir. Bu nedenle test yapılmadan önce numunenin su muhtevası ve partikül boyutu gibi parametrelerin optimum koşulları sağladığına emin olunmalıdır. Kompostun Dewar kabı içinde kendiliğinden ısınmasına dayanan bu teknik solunuma dayalı olup 3-7 gün'lük periyotlarda ölçülen karbondioksit solunumuna dayalı tekniklerle aynı sonucu vermektedir.

Statik yığın denemesi sonucunda elde edilen kompost ürünlerinde yürütülen Dewar testi sonuçları Şekil 6.29 da verilmiştir.



(◆: Organik atık yığını; ▲: Biyolojik çamur+Yonga yığını; o: Biyolojik çamur+Yonga+Prekot yığını; *: Biyolojik çamur+Yonga+Organik atık yığını; ---: Dış ortam hava sıcaklığı)

Şekil 6.29 Statik yığın denemesi kompost ürünlerinde Dewar testi sonuçları.

Statik yığın denemesinden elde edilen kompost ürünlerinde yürütülen Dewar testi çalışmasında, çamur yığının haricindeki bütün yığınların ürünlerinde kendiliğinden ısınma seviyesi ortam hava sıcaklığına kıyasla en yüksek 10 °C ve altında seyretmiştir. Çamur yığını kompost ürününde ise maksimum olarak 17 °C ye kadar ulaşmıştır. Bu durum Dewar olgunluk sınıfı tanımına göre yorumlanırsa; organik atık yığını, prekote katkılı yığın ile organik atık katkılı yığınlardan elde edilen kompostlar çok stabil ve beşinci stabilite sınıfındadır. Çamur yığınınından elde edilen kompost ürünü ise orta stabil olup dördüncü stabilite sınıfındadır. Bu sonuçlardan, çamurun tek başına hacim artırıcı malzemelerle kompostlaştırılmasında stabilizasyon süresinin, ilave karbon kaynağı katkısıyla birlikte kompostlaştırmaya göre daha uzun zaman gerektirdiği söylenebilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Aritma çamurlarına ilave karbon kaynağı olarak prekot çamuru ve organik evsel atık ilave edilerek kompostlaştırma ile stabilizasyonunun araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Pilot reaktörlerde iki paralelli olarak yürütülen çalışmalarda elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olması iyi bir tekrarlanabilirlik olduğunu göstermiştir. Katkı malzemesi olarak kullanılan yonga ve sentetik malzemenin kompostlaştırma prosesine etkisi açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir. Bununla birlikte yonga katkılı reaktörlerde sentetik malzeme katkılı reaktörlere göre sıcaklık yükselmesi biraz daha fazla (yaklaşık 5 °C) gerçekleşmiştir. Çamur ilaveli reaktörlerde sıcaklık beklenen seviyelere (55-60 °C) çıkmamış olup, bu durum çamurda yeterli kolay parçalanabilir karbon olmadığını göstermiştir. Çamura organik evsel katı atık ilavesi ile çok az kolay parçalanabilir karbon sağlanmış ancak bu, sıcaklığın yükselmesi için yeterli olmamıştır. Prekot ilavesi sisteme organik evsel katı atığa nazaran daha fazla kolay parçalanabilir karbon sağlamış ve daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir.

Organik madde miktarı bütün reaktörlerde zamanla azalmıştır. Biyolojik aktivite sonucu organik maddedeki azalma en fazla prekot ilaveli reaktörlerde, daha sonra organik atık ilaveli reaktörlerde ve en düşük olarak katkısız çamur reaktörlerinde gerçekleşmiştir. Bu durum biyolojik çamurların kompostlaştırılmasında, mikrobiyal aktivite için sisteme kolay parçalanabilir karbon temininde, ilave karbon kaynağı olarak prekotun etkin olduğunu göstermektedir. Prekottan daha düşük olmakla beraber, organik atık da sisteme kolay parçalanabilir karbon temin etmiştir.

Reaktörlerden elde edilen ürünlerden çamur/yonga karışımı haricindekilerin su muhtevalarının uygun aralıkta olduğu tespit edilmiştir. Çamur/yonga karışımı reaktörlerin su muhtevaları % 60 civarındadır. Bu durumda, hacimsel olarak 2/1 olan yonga/çamur oranının, biyolojik ayrışma için yeterli gözenek sağlayamadığı söylenebilir.

Prekot katkılı reaktörlerde, prekotun karakterinden dolayı proses süresince kompostun çözünabilir tuz içeriğini gösteren iletkenlik değerleri artmıştır. Bu durum, prekot ile biyolojik çamurların birlikte aerobik stabilizasyonu sonucu elde edilen kompostta, prekotun tuzluluğu artırdığının bir göstergesi olup elde edilen kompost ürününün kullanımını kısıtlamaktadır. Bu bakımdan, biyolojik çamurların prekotla birlikte kompostlaştırılması ile elde edilecek kompostun uygulanacağı toprağın tuzluluk seviyesi dikkate alınmalıdır.

Yapılan kinetik çalışmalar, reaktörlerde gerçekleşen kompostlaştırma sürecinde biyoayrışabilirliğin oldukça yavaş (çamur reaktörlerinde % 13, organik evsel katı atık ilaveli reaktörlerde % 20 ve prekot ilaveli reaktörlerde % 26) olduğunu göstermiştir.

Reaktörlerde, sıcaklığın yeterli seviyeye yükselmemesinin bir sebebi de kullanılan reaktörlerin hacminin (~120L) yeterince büyük olmaması olabilir. Bu nedenle arıtma çamurlarının kompostlaştırılması pilot çalışmalarında daha büyük hacimlerin kullanılması önerilir.

Evsel atıksu biyolojik arıtma çamurlarının, prekot çamuru ile birlikte kompostlaştırılmasında prekotun etkisiyle başlangıç karışım pH sı düşmektedir. Karışımın başlangıç pH sınırı 5,5-9 aralığında kalmasının temini amacıyla, prekot çamuru/biyolojik çamur oranının 1 den büyük olmaması hususu dikkate alınmalıdır.

Dört adet statik ve üç adet aktarmalı yığında yürütülen tam ölçekli çalışmalarda elde edilen sonuçlar, pilot reaktörlerdeki sonuçlarla paralellik göstermekle birlikte genel olarak daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmıştır. Bu durum özellikle sıcaklık yükselmesi problemi olan atıklarla çalışılması durumunda ufak hacimli pilot reaktörlerle çalışılmasının hatalı sonuçlara yol açabileceğini göstermiştir. Yığın çalışmalarında da pilot reaktörlerde olduğu gibi, en düşük sıcaklıklar çamur yığınlarında elde edilmiş, organik evsel atık ilavesi sınırlı da olsa kolay parçalanabilir karbon sağlayarak sıcaklıkları yükseltmiş, prekot ilavesi ile ise istenen yüksek sıcaklıklara ulaşılmasını sağlayarak önemli oranda kolay parçalanabilir karbonun sisteme eklendiğini ortaya koymuştur. Proses süresince izlenen pH, elektriksel iletkenlik, su muhtevası, organik madde ve suda çözünen karbon değerleri prosesin uygun şekilde ilerlediğini göstermiştir. Statik yığınlarda yapılan kinetik çalışmalar, sekiz haftalık kompostlaştırma sürecinde biyoayrışabilirliğin pilot reaktörlerine nazaran oldukça yüksek (çamur yığında % 45, organik evsel atık ilaveli yığında % 65 ve prekot ilaveli yığında %64) gerçekleştiğini göstermiştir. Kompostlaştırma prosesi sonucu elde edilen ürün, stabil olup, ağır metal konsantrasyonları da düşük seviyelerdedir. Bu nedenle elde edilen kompost ürünü arazi uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilecektir.

Yığın metodu ile İBB kompostlaştırma tesisi kapalı sistemi, ürün kalitesi açısından değerlendirildiğinde uyumluluk gösterdiği görülmüştür. Bu durumda, yığın metodu ile proses için gerekli havanın sağlanabildiği görülmüştür. Ancak, açık havada uygulandığı takdirde yığın metodunun hava şartlarından etkilendiği özellikle yağış ile su muhtevalarının arttığı saptanmıştır. Bu durumda yığınların üzerinin örtülmesi, su muhtevası ve özellikle aktarmalı yığınlarda koku kontrolü açısından önemlidir.

Aktarmalı ve statik yığınlarda yürütülen tam ölçekli araştırmada, biyokatıların stabilizasyonunun sağlanabildiği ancak yığın karışımlarının homojen ve tam olarak temininin zor olduğu, ancak homojen karışımın, yığın sıcaklıklarının istenen seviyede temini için çok önemli olduğu tespit edilmiştir.

Hem ekonomik açıdan hem de işletme açısından değerlendirildiğinde yığın metodunun kapalı sistemlere göre birçok avantajı olduğu bilinmektedir. Kapalı sistemlerde mekanik havalandırma kullanılırken yığın metodunda havalandırma aktarma esnasında rahatlıkla sağlanabilmektedir. Aktarma ve sulama için gerekli olan aktarma makinasının temin edilmesi ile işletimi kolay ve ucuz kompost prosesi uygulanabilecektir.

Yığın çalışmasından elde edilen veriler bu metotların kapalı sistemlere iyi bir alternatif olduğunu göstermektedir. Bu durumda, ülkemizde yapılacak olan yeni kompostlaştırma tesislerinin meskun mahallere göre konum ve mesafe de dikkate alınarak işletimi kolay ve ekonomik olan aktarmalı yığın metoduna göre yapımının uygun olabileceğini ortaya koymaktadır. Koku problemi potansiyeli olan yerlerde ise statik yığın metodu kullanılarak biyofiltre ile koku giderimi mümkün olabilmektedir.

Moleküler tekniklerle tür tanımlama sonuçları, tür profilinin farklı sıcaklık koşullarında farklı olduğu ve elde edilen sonuçların literatür verileri ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. İlk aşamada mezofilik bakterilerle birlikte aktinomisetler, mantarlar ve mayalar, yağları, proteinleri ve karbonhidratları ayrıştırırlar. Sırası ile gerçekleşen kompost prosesinde tüm kademeler farklı mikrobiyal türler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu bakımdan kompostlaştırma prosesinin performansı ve gelişimi mikrobiyal türlerle yakından ilişkilidir. Kompostlaştırma esnasında organik maddeyi substrat olarak kullanan mikroorganizmalar kompostlaştırma prosesinin performansını ve gelişimini yansıtmaktadırlar. Organizmaların kompostlaştırma esnasında substratı metabolik yollarla nihai ürünlere dönüştürmesi ile fiziksel ve kimyasal parametrelerde önemli değişiklikler meydana gelmekte ve buna bağlı olarak kompostlaştırma prosesinde rol alan mikrobiyal türlerde değişim meydana gelmektedir. Kompostlaştırma esnasında farklı mikrobiyal türler hızlı ve sırası ile gerçekleşen fiziko-kimyasal değişimlerin meydana geldiği bir ortam oluşturmaktadır. Bu değişimin tam olarak ortaya konması için mikrobiyal karakterizasyon çalışmaları ile daha da anlaşılır hale gelmektedir. Bu yüzden mikrobiyal türlerin belirlenmesinin, kompost prosesi, işleyişi ve ürün kalitesini tayin etme potansiyeli mevcuttur. Bu yüzden organik atıkların farklı mikrobiyal gruplarla nihai ürünlere dönüştürülmesi özel öneme sahiptir. Ancak, hammaddenin farklı olması ve kompostlaştırma için gerekli şartların çeşitliliği sebebiyle (atık türü, tesis dizaynı,

havalandırma oranı, pH, C/N oranı, sıcaklık ve su muhtevası) birçok çalışmanın sonuçları birbirleri ile genelde tam olarak uyumlu olmadığı gibi kompost stabilitesi ile mikrobiyal türler arasındaki ilişki tam olarak belirlenebilmiş de değildir (Ishii and Takii, 2003). Bu çalışmada kompostlaştırma sürecinde rol alan türler PCR, DGGE ve dizi analizi temelli yeni moleküler tekniklerle belirlenerek mevcut literature katkı sağlanmıştır. İlave olarak gelecekte yapılacak çalışmalar için kompostlaştırma sürecinde etkili olan çevresel şartların belirlenmesi konusunda önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Prekot çamuru ile evsel atıksu biyolojik arıtma çamurlarının birlikte kompostlaştırılmasında optimum oran tespitine yönelik yeni çalışmalarda bu çalışmada elde edilen sonuçların dikkate alınması ve pilot reaktör bazlı çalışmalarda da kontrol olarak organik atık içeren pilot reaktörlerin kullanılması önerilir. Ayrıca prekot yerine diğer gıda endüstri çamurları ile birlikte evsel atıksu biyolojik arıtma çamurunun kompostlaştırılması ve elde edilecek kompost ürünlerinin, bitki yetiştiriciliği ve tarım uygulamalarına etkilerinin tespiti de yeni bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, arıtma çamurlarının kompostlaştırma ile stabilizasyonunun karbon kaynağı olarak organik atık ve prekot ilavesi ile sağlanabileceğini göstermiştir. Bu şekilde kendileri de atık olan organik evsel atık ve prekotun entegre bir şekilde bertaraf edilmesi de mümkün olacaktır. Ayrıca prosten toprak şartlandırıcısı potansiyeli olan ve arazi uygulamalarında kullanılabilecek kompost ürünü elde edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akça, L. ve Knudsen, J., (2005), Arıtma Çamurunun Tarımda Kullanılması Halinde Çevrenin ve Özellikle Toprağın Korunmasına ilişkin Konsey Direktifi 86/278/EEC için Direktife Özgü Yatırım Planı, Çevre ve Orman Bakanlığı, Merkezi Finans ve İhale Birimi, Ankara.
- Akça, L., (2005), “Arıtma Çamurlarının Düzenli Depolama Tesislerinde Bertarafı”, Katı Atık Düzenli Depolama Sistemleri Eğitimi Kursu, Kurs Bildiriler klasörü, 09-12 Mayıs 2005, İSTAÇ, İstanbul
- Altınbaş, M., (2000), Anason Posasının Aerobik Kompostlaşabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bach, P.D., Shoda, M. ve Kubota, H. (1984), “Rate of Composting of Dewatered Sewage Sludge in Continuously Mixed Isothermal Reactor”, *Journal of Fermentation Technology*, 62 (3): 285-292.
- Bhoyar, R.V., Olaneya, M.S. and Bhide, A.D., (1979), “Effect of Temperature on Mineralization of Nitrogen During Aerobic Composting”, *Journal of Environmental Health* 1: 23-24.
- Biddlestone, A.J., Gray, K.R., ve Day, C.A., (1987), “Composting and Straw Decomposition, In: Forster, C.F. and Wase”, D.A.J. (eds) *Environmental Biotechnology*, Chichester, UK: Ellis Horwood Ltd, 135-175.
- Chiumenti, A. Chiumenti, R., Diaz, L.D., Savage, G.M., Eggerth, L.L. ve Goldstein, N. (2005), *Modern Composting Technologies*, Biocycle JG Press, PA
- Corbitt, R.A., (1990), *Standard Handbook of Enviromental Engineering*. New York: McGraw-Hill Inc.
- Çakmakçı, M., Kınacı, C., Akça, L, Salter A. K., (2005), “İstanbul Metropolitan Alanı Evsel Atıksu Arıtma Çamurları İçin Yönetim Alternatifleri”, 1. Ulusal Arıtma çamurları Sempozyumu-AÇS2005, Bildiriler Kitabı, 125-137
- De Bertoldi, M., Vallini, G. ve Pera, A. (1982), “Comparison of Three Windrow Compost Systems”, *Biocycle*, 23(2): 45-50.
- De Bertoldi, M., Vallini, G., Pera, A., (1983), “The Biology of composting”, *Waste Management*, 1:157-176
- Dees, P.M. ve Ghiorse, W.C., (2001), “Microbial Diversity in Hot Synthetic Compost as Revealed by PCR-Amplified rRNA Sequences from Cultivated Isolates and Extracted DNA”, *FEMS Microbiology Ecology* 35: 207–216.
- Demir, A. ve Özkaya, B., (2009), “Kentsel Katı Atık Yönetiminde PCR-DGGE-Dizi Analizi Temelli Moleküler Tekniklerle Mikrobiyal Tür Tayini”, *TURKAY 2009, Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu*, 15-17 Haziran 2009, YTÜ, İstanbul.
- Diaz, L. F., Savage, G. M., Eggerth, L. J. ve Golueke, C.G., (1993), *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Dürr, R., Vielhauer, O., Burton, S.G., Cowan, D.A., Punal, A., Brandao, P.F.B., Bull, A.T. ve Syltatk, C., (2006), “Distribution Of Hydantoinase Activity in Bacterial Isolates from Geographically Distinct Environmental Sources”, *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 39: 16-165.
- EC (European Comission), (2001), *Disposal And Recycling Routes For Sewage Sludge Part 3 Scientific And Technical Report*, European Communities, 23 October, 2001.

- EC (European Commission), (2008), "Environmental, Economic and Social Impacts of the Use of Sewage Sludge on Land, Final Report, Part II: Report on Options and Impacts", RPA, Milieu Ltd and WRc, Contract DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r, Belgium.
- EEA (European Environment Agency), (1998), Sludge Treatment and Disposal, Management Approaches and Experiences, Environmental Issues Series no. 7. 14 Jun 1998, Denmark.
- Epstein, E., (1997). The Science of Composting, Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, Basel.
- Filibeli, A., (1998) Arıtma Çamurlarının İşlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:255, İzmir
- Finstein, M. S. ve Morris, M. L., (1975), "Microbiology Of Municipal Solid Waste Composting". Adv. Appl. Microbiol., 19: 113–151
- Fourti, O., Jedidi, N. ve Hassen, A., (2008), "Behaviour of Main Microbiological Parameters and of Enteric Microorganisms During the Composting of Municipal Solid Wastes and Sewage Sludge in A Semi-Industrial Composting Plant", American Journal of Environmental Sciences 4 (8): 103-110.
- Gea, T., Ferrer, P., Alvaro, G., Valero, F., Artola, A. ve Sanchez, A., (2007), "Co-composting of sewage sludge:fats mixtures and characteristics of the lipases involved", Biochemical Engineering Journal 33:275–283
- Gumaelius L, Magnusson G, Pettersson B. ve Dalhammar G., (2001), "Comamonas Denitrificans Sp. Nov., An Efficient Denitrifying Bacterium Isolated from Activated Sludge". Int J Syst Evol Microbiol, 51:999-1006.
- Haug, R.T., (1993), The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Horisawa, S., Sakuma, Y., Nakamura, Y. ve Doi, S., (2008), "Profiling of a Microbial Community Under Confined Conditions in a Fed-Batch Garbage Decomposer by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis" Bioresource Technology 99: 3084–3093
- Hua, L., Wu, W., Liu, Y., McBride, M. B. ve Chen, Y., (2009), "Reduction Of Nitrogen Loss And Cu And Zn Mobility During Sludge Composting With Bamboo Charcoal Amendment", Environ Sci Pollut Res, 16:1–9
- Ingrid, H. F., Whittle, S. H. ve Klammer, H. I., (2005), "Design and Application of an Oligonucleotide Microarray for the Investigation of Compost Microbial Communities", Journal of Microbiological Methods 62: 37– 56.
- Ishii, K., Fukui, M. ve Takii, S., (2000). "Microbial Succession During a Composting Process as Evaluated by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis Analysis" Journal of Applied Microbiology 89: 768–777.
- Ishii, K. ve Takii, S., (2003), "Comparison of Microbial Communities in Four Different Composting Processes as Evaluated by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis Analysis", Journal of Applied Microbiology 95: 109–119.
- İleri, R., (2000), Çevre Biyoteknolojisi, Değişim yayınları, ISBN NO: 975-82-89-13-7, Adapazarı
- İSTAÇ, (2010), Arıtma Çamurları Bertaraf Teknolojileri Raporu, İSTAÇ A.Ş., İstanbul.
- Kaibuchi, Y., (1971), "Research on Composting of City Refuse and Night Soil", Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE, 87: 101-139.
- Kato, S., Haruta, S., Cui, Z. C., Ishii, M. ve Igarashi, Y., (2004), "Effective Cellulose

Degradation By A Mixed-Culture System Composed Of A Cellulolytic Clostridium and Aerobic Non-Cellulolytic Bacteria”, FEMS Microbiology Ecology 51: 133-142.

Kocaer, F. O.ve Başkaya, H. S., (2001) “Arıtma Çamurlarının Araziye Uygulanması”, Ekoloji Dergisi, Uludağ Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa.

Liang, C., Das, K.C. ve McClendon, R.W., (2003), “The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend”, Bioresource Technology 86: 131–137.

Macgregor, S.T., Miller, F.C., Psarianos, K.M. ve Finstein, M.S. (1981), “Composting Process Control Based on Interaction Between Microbial Heat Output and Temperature”, Applied and Environmental Microbiology, 41(6): 1321-1330.

Malina J.F. ve Pohland G.F. (1992) Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes, Vol. 7, Water Quality Management Library, TECHNOMIC Publication.

Margesin, R., Cimadam, J. ve Schinner, F., (2006), “Biological activity during composting of sewage sludge at low temperatures”, International Biodeterioration & Biodegradation 57: 88–92

Metcalf ve Eddy, (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse, McGraw-Hill International Editions, Fourth Edition, New York

Nakasaki, K., Tran, L.T.H., Idemoto, Y., Abe, M. ve Rollon, A.P., (2009), “Comparison of organic matter degradation and microbial community during thermophilic composting of two different types of anaerobic sludge”, Bioresource Technology 100: 676–682

Nielsen, P.H., Mielczarek, A.T., Kragelund, C., Nielsen, J. L., Saunders, A. M., Kong, Y., Hansen, A. A. ve Vollertsen, J., (2010), “A Conceptual Ecosystem Model of Microbial Communities in Enhanced Biological Phosphorus Removal Plants”, Water Research, Baskıda.

NRAES 94 (Naturel Resource, Agriculture and Engineering Service), (1998), Composting for Municipalities Planning and design considerations, NAERS, New York.

Olver, J.W., . Kreye, W. C. ve King, P. H., (1975), “Heavy Metal Release by Chlorine Oxidation of Sludges”, Water Pollution Control Federation. Journal, Vol. 47, No. 10: 2490-2497

Öztürk, İ., (2010), Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları, İSTAÇ A.Ş, Yayını (Baskıda), İstanbul

Öztürk, İ., Timur, H. ve Koşkan, U., (2005). Atıksu Arıtımının Esasları, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara

Öztürk, İ., Erdim, E., Gömeç, Y., Demir, İ., Gençsoy, E., Küçükler, Ö.ve Tezer, H., (2004) “Cargill Orhangazi Mısır İşleme Fabrikası’nda Atık Yönetimi Sonuç Raporu” İTÜ Geliştirme Vakfı İktisatı İşletmesi, Proje No: 2003/09/285

Pedro, M. S., Haruta, S., Hazaka, M. U., Yoshida, C. S., Hiura, K., Ishii, M. ve Igarashi, Y., (2001), “Denaturing Gradient Gel Electrophoresis Analyses of Microbial Community from Field-Scale Composter”, Journal of Bioscience and Engineering, Vol. 91, No. 2: 159-165.

Poincelot, R. P., (1975), “Composting of sewage sludge”, Journal of Fermentation Technology 65: 675-681.

Ponsa, S., Pagans, E. ve Sanchez, A., (2009), “Composting of dewatered wastewater sludge with various ratios of pruning waste used as a bulking agent and monitored by respirometer”. Biosystems Engineering 102:433 – 443

- R&R, (2005), Evsel ve Evsel Nitelikli Atıksu Arıtma Çamurunun Arıtımı, DHV Consultant ve R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti. 21.12.05/report-4d, İstanbul
- R&R, (2010), “Evsel ve Evsel Nitelikli Atıksu Arıtma Çamurunun Arıtımı”, DHV Consultant ve R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti., 12/03/10/report-4d, İstanbul”
- Reinhart, D.R., Deforest, A.R., Keely, S.J. ve Vogt, D.R. (1993), “Composting of Yard Waste and Wastewater Treatment Plant Sludge Mixtures”, *Compost Science and Utilization*, 1 (2): 58-64.
- Ryckeboer, J., Mergaert, J., Vaes, K., Klammer, S., deClercq, D., Coosemans, J., Insam, H. ve Swings, J., (2003), “A Survey of Bacteria and Fungi Occurring During Composting and Self-Heating Processes”. *Ann. Microbiol.*, 53: 349–410
- Sanin, D., (2007) “Atıksu Çamurlarının Arıtımı ve Uzaklaştırılması”, Çevre ve Orman Bakanlığı Brifing Notları, 7 Mart 2007, Ankara
- Sharma, V.K., Caudatelli, M., Fortuna, F. ve Cornacchia, G., (1997), “Processing of Urban and Agro-Industrial Residues by Aerobic Composting: Review”, *Energy Conversion and Management*, 38(5): 453-478.
- Sikora, L.J. ve Sowers, M.A., (1985), “Effect of Temperature Control on the Composting Process”, *Journal of Environmental Quality* 14 (3): 434-439
- Spellman, F.R., (1997), *Wastewater Biosolids to Compost*, Technomic Publishing Company, Pennsylvania, USA.
- SSSA (Soil Science Society of America), (1994), *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*. Madison, WI:SSSA, USA.
- Strom, P. F. (1985), “Ventilation in Composting Wastewater Sludge”. *Journal of the Water Pollution Control. Federation* 54, 111-113.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. ve Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York.
- Thompson, J., (1984), “Experiences at Static Pile Composting Operations”, *Technology Transfer*, U.S. EPA, Municipal Environment Research, Cincinnati, OH.
- TMECC, (2001), *Test Methods for the Examination of Composting and Compost*; US Composting Council, USA.
- Tognetti, C., Mazzarino, M.J. ve Laos, F., (2007), “Cocomposting Biosolids And Municipal Organic Waste: Effects Of Process Management On Stabilization And Quality”, *Biol Fertil Soils* 43:387–397
- Trémier, A., Teglia, C. ve Barrington, S., (2009), “Effect of initial physical characteristics on sludge compost performance”, *Bioresource Technology* 100: 3751–3758
- US EPA, (1981), *Composting Processes to Stabilize and Disinfect Municipal Sewage Sludge*, EPA 430/9-81-011, Office of Water Program Operations, Washington, DC.
- US EPA, (1989), *In-vessel Composting of Municipal Wastewater Sludge*, EPA 625/8-89/016, Center of Environmental Research Information, Cincinnati,
- US EPA, (1979), *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*, US Environmental Protection Agency, EPA625/1-79-001, Washington DC, USA
- Van der Heide and Eisma, M., (1997), *Soil Management: Municipal Solid Waste Disposal - Selected Topics*, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Water Management, Environmental and Sanitary Engineering, Netherlands.

- Vaz-Moreira, I, Figueira V, Lopes A.R., Rüdiger, P., Spröer, C., Schumann P., Nunes, O.C. ve Manaia, C.M. (2009), “*Paenibacillus Residui* Sp. Nov., Isolated From Urban Waste Compost”, *Int J Syst Evol Microbiol.* DOI 10.1099/ijss.0.014290-0.
- Viel, M., Sayag, D. ve Andre, L., (1987), *Optimization of Agricultural Industrial Wastes Management Through in Vessel Composting, Compost: Production Quality and Use*, Elsevier Applied Science, London.
- WEF (Water Environment Federation), (1995a), *Wastewater Residuals Stabilization, Manual of Practice FD-9*, WEF, Alexandria, VA.
- WEF (Water Environment Federation), (1995b), *Biosolids Composting*. WEF, Alexandria, VA.
- Whang, D.S. ve Meenaghan, G.F., (1980), “Kinetic Model of Composting Process”, *Compost Science* 21 (3): 44–46.
- Williams, P. T., (2005), *Waste Treatment and Disposal Technology and Engineering, The Regulation Of Sewage Sludge In Agricultural Use*, John Wiley & Sons Ltd., NY
- Yañez, R., Alonso, J.L. ve Díaz, M.J., (2009), “Influence of Bulking Agent on Sewage Sludge Composting Process”, *Bioresource Technology*, 100: 5827–5833.
- Zitomer, D. H., Duran, M., Albert, R. ve Guven, E., (2007), “Thermophilic Aerobic Granular Biomass for Enhanced Settability”, *Water Research* 41: 819 – 825.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 07.01.1972

Doğum yeri Trabzon

Lise 1983-1990 Vakfıkebir İ. H. Lisesi

Lisans 1990-1994 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi
Çevre Mühendisliği BölümüYüksek Lisans 1997-2000 Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre
Mühendisliği BölümüYüksek Lisans 2002-2003 Robert Morris University Engineering Management
PA, USADoktora 2005-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**Çalıştığı kurumlar**

1994-2001 İSTAÇ A.Ş. Geri Kazanım Şefi.

2002-2003 Robert Morris University Part-time Faculty

2004-Devam ediyor İSTAÇ A.Ş. Proje Etüt Müdürü