



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ÇOKLU BESİYERİ ANAEROBİK ÇAMUR**  
**ÇÜRÜTMENİN BİYOGAZ ELDESİNE**  
**ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

**Fatmanur SARIKAYA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ocak 2020**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Fatmanur SARIKAYA tarafından hazırlanan “Çoklu Besiyeri Anaerobik Çamur Çürütmenin Biyogaz Eldesine Etkisinin Belirlenmesi” adlı tez çalışması 10/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU

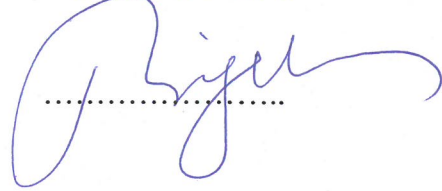
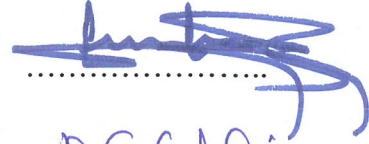
#### Danışman

Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ


#### Üye

Prof. Dr. Bilgehan NAS

### İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım..



Enstitü Müdürü  
Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

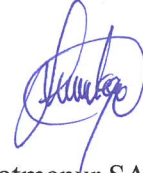
Bu tez çalışması KTÜN BAP Koordinatörlüğü tarafından 191001013 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Fatmanur SARIKAYA

Tarih: 16.01.2020

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Fatmanur SARIKAYA

Tarih: 16.01.2020

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## ÇOKLU BESİYERİ ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTMENİN BİYOGAZ ELDESİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

**Fatmanur SARIKAYA**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ**

**2020, 72 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ  
Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU  
Prof. Dr. Bilgehan NAS**

Bu yüksek lisans çalışmasında, kış mevsimi pazaryeri atıklarının (meyve (MA) ve sebze (SA) atıkları (MSA)) ilavesi ile anaerobik çamur çürütücülerin proses performansı ve stabilize çamur kalitesi üzerindeki etkisinin ayırık ve birleşik çürütme sistemi için araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda primer (PÇ), sekonder (SÇ) ve karışık (KÇ) çamurların sırasıyla 1,65, 0,40 ve 1,0 kg UKM/m<sup>3</sup>.gün organik yükleme hızlarında (OYH), 20 günlük hidrolik bekleme süresinde (HBS) ve 35°C sıcaklıkta çoklu çürütme prosesi lab-ölçekli yarı-sürekli reaktörlerde yürütülmüştür. Öğütülmüş MA, SA veya MSA, PÇ, SÇ ve KÇ yanında çoklu besiyeri olarak farklı bileşim ve oranlarda beslenmiş ve her çamur için kontrol reaktörleri ile paralel olarak izlenmiştir. Reaktörlerden elde edilen optimum spesifik metan üretim (SMÜ) değerleri kontrol reaktörüne kıyasla PÇ ve KÇ için 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda sırasıyla %12 ve 5 ve SÇ için 0,44 g UKM-SA/L.gün'de %55 daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Günlük metan üretimine katkı SA ile PÇ, KÇ ve SÇ için sırasıyla % 34, 67 ve >100 seviyesinde artış olarak gerçekleşmiştir. MA ile çürütmede SMÜ'nde artış PÇ ve SÇ için sırasıyla %5 ve %26 olarak 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'de gerçekleşmiştir. Günlük metan üretimine katkı, 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 1105±80, 1005±40 ve 1050±90 mL/gün olarak benzer seviyelerde elde edilmiştir. Sonuçlar SA'nın çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütmesindeki ayrışabilirliğinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. MA ve SA için ortalama SMÜ değerleri sırasıyla 690±110 ve 905±150 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen</sub>.gün olarak elde edilmiştir. Çoklu anaerobik çamur çürütme proses performansındaki en yüksek artış OYH 1,68 g UKM-MA/L.gün'de MA ve 1,17 g UKM-MSA/L.gün'de MSA ile SÇ çürütmesinde elde edilmiştir. SA'nın yüksek yüklemelerinde metanojenler üzerinde toksik etki oluştuğu için OYH bazında kısıtlı uygulanabilirlik şartı gerçekleşmiştir. UKM gideriminde SÇ için OYH 0,33 g UKM-SA/L.gün ile sadece %9 artış göstermiş ancak diğer çürütücüler için UKM birikimine sebep olmuştur. Çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme sonrası elde edilen stabilize çamurun tarımda kullanılması elektriksel iletkenlik (EC) açısından SÇ için kısıtlı uygulanabilirlik gösterirken, stabilize PÇ ve KÇ için ise yüksek EC değerleri elde edilmiştir. Ortalama N ve P değerleri stabilize PÇ, SÇ ve KÇ numunelerinde sırasıyla 111, 363 ve 202 mg N/g TKM ve 15, 57 ve 26 mg P/g TKM aralığında elde edilmiştir. Sonuç olarak MSA'nın arıtma çamurları ile çoklu anaerobik çürütülmesi stabilize çamurun iletkenliğini arttırırken metan geri kazanımını teşvik etmesi bakımından önemli bir potansiyel olduğunu kanıtlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Anaerobik, çoklu çürütme, arıtma çamuru, metan, organik atık, meyve, sebze, enerji.

## ABSTRACT

## MS THESIS

# DETERMINATION OF THE EFFECT OF MULTIPLE FEEDSTOCK ON BIOGAS PRODUCTION IN ANAEROBIC SLUDGE DIGESTION

**Fatmanur SARIKAYA**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Environmental Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ**

**2020, 72 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ  
Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU  
Prof. Dr. Bilgehan NAS**

In the present graduate study, it is aimed to investigate the effect of winter marketplace wastes (fruit (FW) and vegetable (VW) wastes (FVW)) on the process performance and stabilized sludge quality in separate and combined anaerobic sewage sludge digestion system. For this purpose, co-digestion of primary (PS), secondary (SS) and mixed (MS) sludge fractions fed respectively at 1.65, 0.40 and 1.0 kg VS / m<sup>3</sup>.day volatile loading rates (VLR) was studied at a hydraulic retention time (HRT) of 20 day and 35°C temperature in lab-scale semi-continuous reactors. The grinded FW, VW or FVW were fed in different compositions and proportions as multiple feedstock to PS, SS and MS digestion with parallel control reactor monitoring. The optimum specific methane production (SMP) values obtained in co-digestion were 12 and 5% higher respectively in 0.33 g VS-VW/L.d for PS and MS with 55% surplus in SS digestion at 0.44 g VS-VW/L.d compared to the control reactors. The increase in daily methane production was obtained at 34, 67 and higher than 100% in PS, MS and SS co-digestion with VW, respectively. In FW co-digestion, 5 and 26% increase were obtained in SMP at 0.84 g VS-FW/L.d in PS and SS co-digestion. The effect on daily methane production proceeded at similar levels as 1105±80, 1005±40 and 1050±90 mL/d for PS, SS and MS co-digestion, respectively, at VLR of 1.68 g VS-FW/L.d. Results indicated a higher biodegradability on the VS base for VW. Average SMP values for FW and VW digestion were obtained as 690±100 and 905±150 mL CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub>.d, respectively. The highest increase in digestion performance was obtained in SS co-digestion at VLRs 1.68 g VS-FW/L.d and 1.17 g VS-FVW/L.d. VW addition produced a limited feasibility on VLR as high loading produced a toxic effect on methanogenesis. An increase in the VS removal was only obtained as 9% in SS co-digestion at 0.33 g VS-VW/L.d whereas VS accumulation took place in other digesters. Stabilized SS showed a limited feasibility towards use in agriculture with electrical conductivity (EC) level whereas higher EC values were obtained in stabilized PS and MS samples. Average N and P contents were determined as 111, 363 and 202 mg N/g dry solid and 15, 57 and 26 mg P/g dry solid for PS, SS and MS, respectively. Consequently, anaerobic sewage sludge co-digestion with FVW proved a considerable potential in promoting the methane recovery while it increased EC in the stabilized sludge.

**Keywords:** Anaerobic, co-digestion, sewage sludge, methane, organic waste, fruit, vegetable, energy.

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu çalışmanın yürütülmesi sürecinde teşviki, rehberliği ve sabrı ile tüm yoğunluğuna rağmen değerli bilgilerini, tecrübelerini ve zamanlarını benden esirgemeyen, her düşünceme ve talebime ilgiyle yaklaşan, hiç unutmayacağım çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ'ye sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez komitesi üyelerim Sayın Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU ve Prof. Dr. Bilgehan NAS'a tezimi okumak ve yorumlamak için değerli zamanlarını ayırdıkları için çok minnettarım.

Üniversitede eğitim gördüğüm süre boyunca değerli tavsiyeleri, birikim ve tecrübeleri ile bana hep yol gösteren, ilham veren, hem bilimsel hem de kişisel olarak kendisinden çok şey öğrendiğim çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Esra YEL'e en derin saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın yürütülmesi esnasında bana her konuda büyük yardımı dokunan Arş. Gr. Hamza AYSAN hocama saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

Bu süreçte verdikleri motivasyon ve güçle hep yanımda olan değerli geniş aileme, maddi manevi tüm desteğini sabırla veren canım annem Fatma SARIKAYA'ya, babam Hacı Rahim SARIKAYA'ya, ablam Şeyma ÖZŞAPÇI'ya, kardeşlerim Ali Sinan SARIKAYA ve Recep SARIKAYA'ya ve bana hep inanan ve destek olan değerli nişanlım İbrahim Halil SAMAK'a sevgiyle teşekkür ederim.

Son olarak isimlerini tek tek sayamadığım, zaman zaman başlarını ağrıttığım sevdiklerime şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın gerçekleştirilmesinde projeye maddi desteklerinden dolayı Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Fatmanur SARIKAYA  
KONYA-2020

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amaç ve Kapsamı .....	3
1.2. Tez Çalışmasının Temel Motivasyonu ve Önemi .....	3
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>5</b>
2.1. Arıtma Çamurlarının Özellikleri ve Stabilizasyonu .....	5
2.2. Anaerobik Çamur Çürütme Prosesi .....	7
2.2.1. Anaerobik çürütme basamakları .....	8
2.2.2. Anaerobik çürütmeyi etkileyen faktörler .....	9
2.2.2.1. Organik yükleme hızı.....	9
2.2.2.2. Hidrolik bekletme süresi (HBS) .....	10
2.2.2.3. Karıştırma .....	10
2.2.2.4. pH.....	10
2.2.2.5. Alkalinite .....	10
2.2.2.6. Sıcaklık .....	11
2.2.2.7. Uçucu yağ asitleri (UYA) .....	11
2.2.2.8. Nutrientler .....	11
2.2.2.9. Toksikite .....	12
2.2.3. Anaerobik çürütmenin avantajları ve dezavantajları .....	12
2.3. Çoklu Besiyeri Anaerobik Çürütme Proses Uygulamaları .....	13
2.3.1. Çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme prosesinde kullanılan atıklar ve uygulama alanları.....	13
2.3.2. Çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütmenin avantajları ve dezavantajları ..	14
2.3.3. Yasal Yönetmelikler .....	15
2.3.4. Konuya İlişkin Literatür Çalışmaları .....	16
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>18</b>
3.1. Ham Çamur ve Organik Atıkların Toplanması ve Karakterizasyonu.....	18
3.2. Yarı-Sürekli Anaerobik Reaktör Deney Düzenegi, İşletimi ve İzlenmesi.....	20
3.3. Analitik Yöntemler .....	24
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>25</b>
4.1. Yarı-Sürekli Anaerobik Çürütme Sonuçları .....	25
4.1.1. Spesifik metan üretimi (SMÜ).....	25



4.1.2. Günlük metan üretimi .....	31
4.1.3. UKM konsantrasyonu ve giderimi.....	34
4.1.4. pH değişimi.....	39
4.1.5. UYA ve HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ilişkisi.....	41
4.1.6. İletkenlik ve TKM değişimi.....	44
4.1.7. Susuzlaşma kabiliyeti .....	47
4.1.8. TN ve TP içeriği .....	48
4.2. Sonuçların Değerlendirmesi .....	50
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>55</b>
5.1. Sonuçlar .....	55
5.2 Öneriler .....	58
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>59</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>63</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

C: Karbon  
N: Azot  
P: Fosfor  
CO<sub>2</sub>: Karbondioksit  
CaCO<sub>3</sub>: Kalsiyum Karbonat  
CH<sub>4</sub>: Metan Gazı  
H<sub>2</sub>: Hidrojen  
H<sub>2</sub>S: Hidrojen sülfür  
HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Bikarbonat  
NaOH: Sodyum Hidroksit  
NH<sub>3</sub>: Amonyak  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrat  
SO<sub>2</sub>: Sülfür  
SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: Sülfat

### Kısaltmalar

AAT: Atıksu Arıtma Tesisi  
AÇ: Anaerobik Çürütme  
AB: Avrupa birliği  
CHP: Kombine Isı ve Güç  
EC: Elektriksel İletkenlik  
ETKB: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı  
HBS: Hidrolik Bekleme Süresi  
KÇ: Karışık Çamur  
MA: Meyve Atıkları  
MSA: Meyve Sebze Atıkları  
MTEP: Milyon Ton Eşdeğer Petrol  
OYH: Organik yükleme hızı  
PÇ: Birincil Çamur (Ön çöktürme çamuru)  
SA: Sebze Atıkları  
SÇ: Sekonder Çamur (Fazla aktif çamur)  
SMÜ: Spesifik Metan Üretimi  
TA: Toplam Alkalinite  
TKM: Toplam Katı Madde  
TN: Toplam Azot  
TP: Toplam Fosfor  
UKM: Uçucu Katı Madde  
UYA: Uçucu Yağ Asitleri  
w:w: Ağırlıkça yüzde

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve hızlı nüfus artışıyla birlikte dünya çapında enerji tüketiminin artması, kaynakların azalmasına, fosil yakıtlarının büyük oranda kullanılmasına ve sera etkisini artırarak çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Gelişmiş dünya ülkeleri enerjide sürekliliği sağlamak ve çevreye verdikleri zararı önemli ölçüde azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir.

Son yıllarda Türkiye’de özellikle sanayi ve tarım alanında önemli gelişmeler sağlanmıştır. Endüstriyel gelişimin artmasıyla, Dünya’da olduğu gibi Türkiye’nin de enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir kalkınma ve insanlığın yaşam koşullarını yükseltmek için bu artan talebin karşılanması gerekmektedir.

Türkiye, birçok enerji kaynağına sahip olmasına rağmen enerji ihtiyacını dışarıdan karşılayan enerji ithalatçısı bir ülkedir (Gokcol ve ark., 2009). Enerjide dışa bağımlılığın artması ise önemli siyasi ve ekonomik kaygılara neden olmaktadır. Oysa ülkemiz, bu enerji bağımlılığını önlemek için kullanabileceği yenilenebilir enerji kaynakları bolluğuna ve kendi enerjisini sağlama potansiyeline sahiptir.

Ülkemizde rüzgâr, güneş, hidrolik ve jeotermal enerji potansiyeli gibi faydaya dönüştürülebilecek önemli miktarda yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra, biyokütle kaynaklarıyla elde edilen enerji, elektrik üretimi, ev ısıtması ve endüstriyel tesisler için proses ısısı sağlama gibi çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılır. Özellikle fosil yakıtlara kıyasla hava emisyonlarını azalttığından ve giderek artan potansiyele sahip olduğundan, biyokütle, alternatif olduğu düşünülen en umut verici enerji kaynaklarından biridir (Gokcol ve ark., 2009).

Biyokütle kaynakları ile enerji elde etmek için çeşitli yöntemler vardır. Yakma, gazlaştırma, piroliz ve anaerobik çürütme, en yaygın kullanılan seçenekler olarak sıralanabilir. Diğer seçeneklere kıyasla anaerobik çürütme, en verimli enerji üretim sürecidir (Schnurer ve Jarvis, 2010). Özellikle çürütme sürecinin sonunda biyogaz elde edilmesi ve atığın stabilizasyonu sebebiyle, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için AB hedeflerinin sağlanması bakımından büyük önem taşımaktadır.

Ülkemizde nüfusun ve atıksu arıtma tesislerinin (AAT) artmasıyla birlikte, tesislerden çıkan arıtma çamurları miktarı da artış göstermektedir. Oluşan arıtma çamurlarının stabilizasyonunda en çok kullanılan yöntem anaerobik çamur çürütme prosesidir. Anaerobik çürütme işlemleri, çamurun etkin bir şekilde bertaraf edilmesi ve

değerlendirilmesi için endüstriyel ölçekte kullanılmaktadır. Ancak, arıtma çamurunun anaerobik çürütülmesinden oluşan metan verimi diğer organik atık türlerine kıyasla düşük kalmaktadır. Bu nedenle, ön arıtım işlemleri ve organik maddelerle birlikte çürütülmesi ile metan potansiyeline ve çamur kalitesindeki iyileştirmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir (Elalami ve ark., 2019).

Anaerobik çürütme, farklı mikroorganizma gruplarının rol aldığı kompleks bir biyokimyasal süreçtir ve en önemli avantajı çürütme sonrası üretilen metan gazından ısı ve enerji elde edilmesidir (Parkin ve Owen, 1986). Ancak substratların tekli kullanımı, beslenme dengesizlikleri, mikroorganizma eksikliği ve operasyonel faktörleri etkilemesi nedeniyle zordur ve bunun için birlikte çürütme süreci önerilmektedir (Mata-Alvarez ve ark., 2000).

Birlikte anaerobik çürütme, iki ve ya daha fazla substratın eş zamanlı anaerobik sindirimi olup, tekli anaerobik çürütme dezavantajlarının üstesinden gelmek ve biyogaz üretimini artırmak için ümit vadeden bir seçenektir (Hagos ve ark., 2017). Geleneksel olarak anaerobik çürütme, arıtma çamurları arıtımı için benimsenmiştir ancak, bunların aşırı konsantrasyonu atıksu arıtma tesislerinin tüm ekonomisini geri kazanamadığı için organik atıklarla birlikte anaerobik çürütülmesiyle önem kazanmaktadır.

Türkiye'deki başlıca organik katı atık kaynaklarından biri, meyve ve sebze atıklarıdır. Meyve ve sebze atıkları (MSA) marketlerde, pazarlarda ve sebze meyve hallerinde önemli miktarlarda üretilir. MSA, yüksek nem içeriğiyle biyolojik olarak parçalanabilir ve biyogaz üretimi için potansiyel bir substrat olarak kullanılabilir (Ganesh ve ark., 2014).

Katı madde içeriği yüksek olan organik katı atıklar, nispeten daha düşük katı maddeli atıklarla (arıtma çamurları, hayvansal atıklar vb.) karıştırılarak birlikte anaerobik olarak arıtılabilir. Arıtma çamurundaki makro ve mikro nütrientler organik katı atıklardaki nütrient eksikliğini kapatmaktadır. Ayrıca hem organik katı atığın katı madde içeriği düşürülebilir hem de tesisin biyogaz veriminde önemli bir artış sağlanabilir.

Ticari ölçekte anaerobik olarak çürütülen arıtma çamurlarına gıda atıkları ilavesi, son on yıldan bu yana Almanya, Danimarka, İsviçre ve İngiltere'de gerçekleştirilmiş ve anaerobik çürütme teknolojisinin iyileştirilmiş ekonomisi ile sonuçlanmıştır (Iacovidou ve ark., 2012). Birçok Avrupa ülkesinde çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme tesislerinin sayısı sürekli artmakta ve tarım sektöründe de standart bir uygulama haline gelmektedir.

## 1.1. Tezin Amaç ve Kapsamı

Günümüzde mevcut kentsel atıksu arıtma tesislerinin birçoğunda çamur çürütücü ünitesi bulunmaktadır ve biyogaz üretimine katkısı bakımından organik atıkların arıtma çamurlarıyla birlikte arıtımını oldukça cazip kılmaktadır. Bu sayede birlikte çürütme yaklaşımı, katı atık ve arıtma tesislerinde oluşan fazla çamur gibi iki büyük atık akımını birleştirerek ve büyük yatırımlara gerek kalmadan uygulanabilmektedir. Ancak arıtma çamurları ile gıda atıklarının birlikte anaerobik çürütülmesi için, farklı organik madde türlerine göre ikincil besiyeri olarak kullanılmasında ara ürün, substrat ve ya son ürün toksisitesi oluşumuna karşılık prosesin optimizasyon ihtiyacı bulunmaktadır.

Bu bakımdan bu çalışmada arıtma çamurlarının mevcut ve ayırık anaerobik çürütme prosesinde meyve sebze atıklarıyla çoklu stabilizasyon performansı incelenmiştir. Meyve ve sebze atıklarının öğütüldükten sonra primer, sekonder ve karışık çamur yanında ikincil besiyeri olarak yarı-sürekli anaerobik çürütücülere beslenmesi ile proses fizibilitesinin belirlenmesi ve arıtma çamurlarının ayrışabilirliğini artırması ile anaerobik çamur çürütücülerin gaz üretim potansiyeline etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

## 1.2. Tez Çalışmasının Temel Motivasyonu ve Önemi

Anaerobik çamur çürütme prosesi, atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılan ve enerji eldesi sağlayan önemli bir teknolojidir. Anaerobik çamur çürütücülerin gaz üretim potansiyelini artırmak üzere arıtma çamurlarının organik katı atıklar ile çoklu stabilizasyonu, prosese önemli katkılar sağlamakta ve giderek yaygınlaşmaktadır. Çoklu çürütmenin sağladığı çeşitli faydalar hem proses etkinliğinin artışı hem de son ürün stabilize çamur kalitesindeki iyileşme olarak ortaya çıkmaktadır. Çürütücüye beslenen atığın organik madde içeriği kısa sürede azaltılabilmekte, son ürün stabilize çamurda nütrient içeriği artmakta, bazı atıkların ilavesinde arıtma çamurunun ayrışabilirliği yükselmekte ve metan üretiminde artış gerçekleşmektedir.

Anaerobik çamur çürütme prosesinin önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olan organik atıkların değerlendirilmesindeki işlevinin yanı sıra çıkış stabilize çamurun da toprak şartlandırmaya kullanıma uygun olması sürdürülebilir kalkınma için önemli bir konudur. Fakat zincirleme reaksiyonlar şeklinde gerçekleşen bu prosesin pH, uçucu yağ asitleri (UYA), ürün toksisitesi ve hız kısıtlayıcı basamaklar gibi birçok denge üzerinde

ilerlemesi ve farklı atıkların proses dengesine farklı etkileri sebebiyle stabilizasyonunda proses optimizasyonu gerekmektedir.

Tez çalışması mevcut kentsel AAT'lerde oluşan primer (PÇ), sekonder (SÇ) ve karışık çamurların (KÇ) lab-ölçekli yarı-sürekli anaerobik reaktörlerde mezofilik (35°C) sıcaklıkta farklı yükleme değerlerindeki MSA ile birlikte yürütülerek proses fizibilitesinin belirlenmesine ve anaerobik çoklu stabilizasyon performansının incelenmesine katkı sağlayacaktır.

Kentsel AAT çamur hattının optimizasyonu amaçlı farklı çalışmalar yürütülmekte ve enerji eldesi ile stabilizasyon veriminin artırılması, sürdürülebilir atıksu yönetimi kapsamında dünyanın birçok ülkesinde önem kazanmaktadır. Çoklu besiyeri anaerobik stabilizasyon özellikleri mevcut durumdaki karışık ve farklı ayrışabilirlik özelliklerinden dolayı PÇ ve SÇ için ayrık çamur çürütme modelleri kapsamında hem proses için hem de çıkış/stabilize çamur kalitesinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

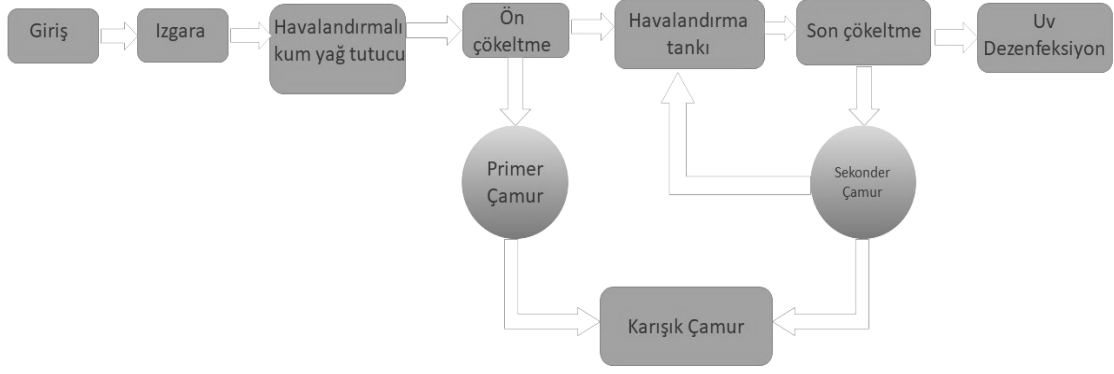
Bu bölümde arıtma çamurlarının farklı fraksiyonlarının özellikleri ve stabilizasyonu, anaerobik çamur çürütme prosesi ve işletimi, çoklu anaerobik çamur çürütme prosesi işletimi ve çoklu anaerobik çürütme konusundaki yasal yönetmelikler hakkında kuramsal bilgiler ile konuya ilişkin literatür çalışmaları yer almaktadır.

### 2.1. Arıtma Çamurlarının Özellikleri ve Stabilizasyonu

Kentsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde atıksuların arıtılması sonucu oluşan bir yan ürün olarak ortaya çıkan, ağırlıkça %0,25-1,2 katı madde içeren, kendiliğinden çökebilen, yarı katı ve ya sıvı haldeki atıklar “arıtma çamuru” olarak isimlendirilmektedir. Çeşitli organik ve inorganik maddeleri içeren arıtma çamurlarının %60-80’i organik bileşenlerdir.

Atıksu arıtma tesislerinde çeşitli fiziksel ve biyokimyasal işlemler sonucu oluşan arıtma çamurları primer, sekonder ve karışık çamur olarak sınıflandırılabilir. Klasik bir atıksu arıtma tesisindeki işlem sırası ve oluşan çamurlar Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Arıtmada ilk işlem, büyük bileşenlerin uzaklaştırılması için ayırma işlemidir. Akıntıdaki kum ve diğer ağır katılar kum tutucu haznesinde kalır ve atıksu çöktürme işleminin gerçekleştiği birincil arıtma aşamasına iletilir. Birincil arıtmada atıksudaki katı maddelerin yaklaşık %40-50’si giderilir, böylece “primer çamur” oluşturulur. Sonra, atıksuyun içinde kirletici maddeler, hetetrotrofik bakterilerin organik madde ve besinleri oksijenle tükettikleri havalandırma tankında uzaklaştırılır. Katı maddelerle karışan mikroorganizmalar daha sonra ikincil çökelticide çökeltilir ve havalandırma havuzuna kısmen geri iletimi sağlanan çamur “sekonder ve ya aktif çamur” olarak isimlendirilir. Üçüncül işlem gibi tamamlayıcı işlemler, artık askıda bırakılmış katıların ve besinlerin (azot ve fosfor gibi) giderilmesi için gerekli olabilir. Primer ve sekonder çamur ayrı hattan gelip birleştirilerek “karışık çamur” oluşur. Buradan sonra çamur yoğunlaştırılır, çürütülür, susuzlaştırılır ve sonunda bertaraf edilir (Elalami ve ark., 2019).

Arıtma çamurlarının uygun işletimi ve bertaraf yöntemlerinin belirlenebilmesi için çamurun yapısal özelliğinin bilinmesi gerekmektedir. Arıtma çamurlarının yapısal özellikleri, çamur ve katı maddenin kaynağına ve uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak değişmektedir (Filibeli, 2017).



**Şekil 2.1.** Atıksu arıtma tesisi işlemleri ve çamurun sınıflandırılması

PÇ gri ve yapışkan olup, çoğu zaman yoğun kokuludur. Yapısında protein, lipid ve karbonhidrat gibi organik maddeleri içerir. Biyogaz oluşumu fazladır ve anaerobik çürütücü hacim ihtiyacı azdır. Bu çamur kolaylıkla çürütülebilir.

SÇ kahverengi ve flok ağırlıklıdır. İyi şartlardaki çamur toprak kokusundadır. Yapısında canlı bakteri biyokütlesi içerir. Bu çamur kolaylıkla septikleşmeye meyillidir, çürük yumurta kokusu yayabilir. Biyogaz oluşumu azdır anaerobik çürütücü hacim ihtiyacı fazladır. Tek başına veya PÇ ile karışmış SÇ anaerobik çürütmeye tabi tutulur.

Anaerobik olarak çürütülmüş KÇ, koyu kahverengi ile siyah arası bir renktedir, büyük miktarlarda gaz içerir ve bertaraf edilmeden önce susuzlaştırma işlemine tabi tutulur (Erdirençelebi, 2017).

Arıtma çamurlarının yüksek organik madde içeriğine sahip olması, biyolojik bozulmanın kompostlama veya anaerobik çürütme yoluyla yapılabilirliğini açıkça göstermektedir. Genel olarak PÇ'nin bozulması daha kolaydır. Bunun sebebi, PÇ daha kolay bozunabilen polisakkaritler ve yağlar içerirken, SÇ'nin mikroorganizmalar, ekzopolimerik maddeler ve parçalanmamış organik ve mineral maddeler içermesi olarak açıklanabilir (Le ve ark., 2015). KÇ içerisinde oluşan patojenler açısından daha az kokulu ve daha güvenlidir ve PÇ ve SÇ tiplerinden daha kolay susuzlaştırılır (Liu ve Liptak, 1999).

AAT'lerinde oluşan arıtma çamurları, içerisindeki patojenleri yok etmek, rahatsız edici kokuları gidermek, oluşturduğu tüm olumsuz etkileri engellemek ve bununla birlikte risk taşıyan faktörleri en aza indirerek ortadan kaldırmak amacıyla bertaraf edilmeden önce stabilize edilmesi gerekmektedir (Filibeli, 2017).

Arıtma çamurları için kireç ile stabilize etme, aerobik çürütme, anaerobik çürütme, ısıtma işlemi (yakma) ve kompostlama gibi stabilizasyon yöntemleri



uygulanabilmektedir. Burada anaerobik çürütme, hem çamur hacmini hem de çamur bertaraf maliyetlerini azalttığı ve maddi geri kazanıma olanak sağladığı için diğer stabilizasyon yöntemlerinden daha fazla tercih edilmektedir.

Anaerobik çürütme işlemi ile arıtma çamurlarının stabilizasyonu, enerji kaynağı olarak kullanılabilen ve atıksu arıtma tesislerinin kendine yetebilmesine katkıda bulunan 'biyogaz' ile çamurun kalitesine ve mevcut mevzuata göre tarımda geri kazanımını sağlayan bir 'besin' üretilmesi bakımından avantaja sahiptir (Shi ve ark., 2018).

## **2.2. Anaerobik Çamur Çürütme Prosesi**

Dünyada farklı türdeki atıkların (hayvansal atıklar, evsel gıda atıkları, tarımsal atıklar, organik endüstriyel atıklar vb.) arıtılması için birkaç eski teknoloji vardır. Tarihsel bulgular anaerobik çürütme sürecinin en eski teknolojilerden biri olduğunu göstermektedir (Pramanik ve ark., 2019). Grando ve ark. (2017), anaerobik çürütme kavramının 1870'lerde septik tank sisteminin geliştirilmesiyle ortaya çıktığını bildirmişlerdir. De Baere ve Mattheeuws (2013)' e göre, anaerobik çürütme sistemi 1980'lerde endüstriyel ve belediye atık sularının, arıtma çamurlarının ve ya belediye katı atıklarının arıtılmasında daha yaygın olarak kullanılmaya başlansa da yeni bir teknoloji değildi, 17. yüzyılda zaten biliniyordu. O zamandan günümüze anaerobik çürütme araştırıldı, kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan tanımlandı ve günümüzde atık suların ve arıtma çamurları başta olmak üzere katı atıkların arıtılmasında yaygın olarak kullanılan bir teknoloji haline geldi.

Anaerobik çürütme kısaca, anaerobik koşullar altında (katı oksijen yokluğunda) çalışan mikroorganizma konsorsiyumunun kompleks biyolojik olarak çözülebilir organik maddeyi parçalayarak biyogazın (%50-80 metan ve %30-50 karbondioksit) elde edildiği biyokimyasal bir süreçtir (Grando ve ark., 2017). Elde edilen biyogaz, bir kombine ısı ve güç (CHP) sistemi ile değerli bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisine ve ısıya dönüştürülerek kullanılabilir.

Anaerobik çürütme, evsel ve endüstriyel atık suların arıtılmasıyla oluşan arıtma çamurlarının stabilizasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır. Çünkü anaerobik çamur çürütme süreci, arıtma çamurlarının bertaraf edilmesi için en gelişmiş ve ekonomik yollardan birini temsil etmektedir (Cao ve Pawłowski, 2012).

Karhikeyan ve ark. (2018)'e göre, büyük ölçekli biyogaz tesislerinin kurulması için, Almanya ve İsviçre, küresel biyogaz endüstrisinde öncü ülkelerdir. Yenilenebilir

enerji üretmek ve 2020 Avrupa Birliği (AB) hedefine ulaşmaya katkıda bulunmak için anaerobik çürütme, Türkiye için de uygun bir yol olabilir (Beurskens ve ark., 2011).

### 2.2.1. Anaerobik çürütme basamakları

Anaerobik çürütme işleminin çeşitli aşamalarında, farklı türden oluşan çok sayıda mikroorganizma topluluklarının birlikte aynı ortamda çalışmaları sonucunda metan elde edilmektedir. Anaerobik çürütmedeki bu işlemler temelde üç aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi işlemleri olarak gerçekleşmektedir (Öztürk, 2007).

1. Aşama Hidroliz: Anaerobik çürütmenin ilk adımı olan hidrolizde, polimerik yapıdaki organik maddeler hücre dışı enzimler tarafından hücre zarından geçebilecek mikroorganizmalar tarafından kolayla parçalanabilecek daha basit yapıdaki çözülmüş ürünlere dönüştürülür (Mata-Alvarez, 2002). Bu dönüşüm hidrolitik fermentatif bakterilerin hücre dışı enzim salgılaması yoluyla gerçekleşmektedir. Karbonhidratlar, protein ve lipitlerden oluşan ve karmaşık yapıya sahip organik materyaller, oksijensiz bir ortamda mikroorganizmalar tarafından şekerler, amino asitler ve uzun zincirli yağ asitleri gibi daha basit bileşiklere indirgenirler (Gerardi, 2003).

2. Aşama Asit Üretimi: Bu aşamada hidroliz ürünleri esas olarak asetik asite dönüştürülmektedir ve dışarıdan herhangi bir elektron alıcı ve ya vericiye ihtiyaç duyulmaksızın asit üretiminin gerçekleştiği mikrobiyal bir süreçtir. Anaerobik çürütmenin ikinci aşaması olan asitleşmede, iki ayrı bakteri grubu rol aldığı için bu süreç literatürde birbiri ardına gerçekleşen asidojenesis ve asetojenesis aşamaları olarak yer almaktadır. Asidojenesis aşamasında, bütirik, izobütirik, propiyonik, valerik ve izovalerik gibi asitler uçucu yağ asitlerinin üretimi gerçekleşmektedir. Elde edilen uçucu yağ asitleri H<sub>2</sub> üreten bakteriler tarafından asetik asit, hidrojen ve karbondioksit'e dönüştürülmektedir. Asidojenesisten sonra asetik asit üretiminin gerçekleştiği asetojenesis aşaması gelir. Burada iki grup asetojen bakteriler bir arada bulunur; baskın grup sentojenik asetojenik bakteriler uçucu yağ asitlerinden asetat, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> üretir, homoasetojen (diğer adıyla Hidrojenotrofik Metanojen) grubu bakteriler ise CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>'yi asetata dönüştür. Bütirik, propiyonik ve valerik asitler gibi uçucu yağ asitleri asidojenler sayesinde elde edilir ve arıtma çamuru gibi karmaşık organik maddeler olduğunda hidrolizden daha hızlıdır (Elalami ve ark., 2019).

3. Aşama Metan Üretimi: Anaerobik çürütmenin üçüncü ve son aşaması olan metan üretimi yavaş bir süreçtir ve genellikle hız sınırlayıcı aşama olarak kabul

edilmektedir. İkinci aşamada üretilen asetik asitin metan bakterileri tarafından parçalanması ve/ve ya  $H_2$  ile  $CO_2$ 'nin sentezlenmesi sonucu metan üretimi gerçekleşmektedir. Asetik asit tüketen metanojenlerin reaksiyon hızı yavaş olmasına karşılık,  $H_2$  ve  $CO_2$  tüketen türler daha hızlı çoğalır. Bu hızlı çoğalma özellikleri sistemde  $H_2$  konsantrasyonunun düşmesine sebep olur. Dolayısıyla sistemdeki diğer reaksiyon ve bakteri türleri aktivitelerine normal olarak devam ederler (Öztürk, 2007). Bu aşama metanojenesis olarak isimlendirilmektedir.

Anaerobik çürütme sonucu metanın teorik olarak %70'i asetattan ve %30'u  $CO_2$  ve  $H_2$ 'den üretilmektedir. Fang ve ark. (2015)'a göre asetoklastik ve hidrogenotropik topluluklar arasındaki oran 70/30 olsa da, esas olarak bu oran çalışma koşullarına, hammadde bileşimine ve inhibitörlerin varlığına bağlıdır (Appels ve ark., 2008).

### **2.2.2. Anaerobik çürütmeyi etkileyen faktörler**

Anaerobik çürütme proseslerinden en iyi verimi alabilmek ve çürütme işlemini gerçekleştiren mikroorganizmalardan en iyi şekilde faydalanabilmek için reaktörde optimum çevre şartlarının sağlanabilmesi gereklidir. Bu şartların sağlanabilmesi ve devamlılığının korunabilmesi için bazı temel faktörlere özellikle dikkat edilmesi gereklidir. Anaerobik çürütmede arıtıma etki eden temel faktörler organik yükleme hızı (OYH), hidrolik bekletme süresi (HBS), çamur yaşı, karıştırma, pH, alkalinite, sıcaklık, uçucu yağ asitleri (UYA), nütrientler ve toksisitedir.

#### **2.2.2.1. Organik yükleme hızı**

Organik yükleme hızı, günlük olarak beslenen ham madde miktarı ve çürütücünün birim hacmi olarak tanımlanmaktadır. Khanal (2011)'a göre anaerobik çürütme sistemlerinin önemli kontrol parametrelerinden biridir.

OYH organik maddelerin anaerobik reaktörlerde çürütülerek metan oluşumu sırasında çürütücüde tutulan metan bakterilerinin miktarı ile sınırlandırılır. Çok yüksek bir yükleme hızı, düşük metan veriminin yanı sıra sistemde uçucu yağ asitlerinin birikmesine sebep olur. Çürütme hızı genellikle sekonder çamur için gözlemlendiği gibi hidroliz aşamasında sınırlandırıldığında, sisteme beslenen çamurun bir kısmı bu aşamada yeteri kadar parçalanamayacağı için metan verimini düşürür. Bu nedenle bu parametrenin kontrol edilmesi gerekir (Elalami ve ark., 2019).

#### **2.2.2.2. Hidrolik bekletme süresi (HBS)**

Hidrolik bekletme süresi (HBS), anaerobik çamur çürütme sistemine verilen organik atığın mikroorganizmalar tarafından tamamen parçalanarak biyogaz üretilmesi için gerekli olan süredir ve mikrobiyal büyüme ile ilişkilidir. HBS sistemdeki proses sıcaklığı ve atıkların bileşimine bağlıdır (Kwietniewska ve Tys, 2014). Mezofilik olarak işletilen bir sistemde atıklar için ortalama HBS 15-30 gündür ve bu süre termofilik işletme şartlarında biraz daha kısadır (Monnet, 2003). HBS kısaysa sistemde bileşenler tam kullanılamaz ve UYA birikimine sebep olur (Nagamani ve Ramasamy, 1999).

#### **2.2.2.3. Karıştırma**

Biyolojik arıtma sistemlerinde organik maddelerin biyokütle ile temasını sağlamak için reaktörün karıştırması gereklidir. Anaerobik çürütücülerde karıştırma işlemi sayesinde reaktör içerisindeki homojenlik artar, biyokütle ile teması arttığından reaksiyon hızlanır ve dolayısıyla biyogaz çıkışı kolaylaşır. İlkılıç ve Deviren (2011)'e göre iyi ve uygun bir karıştırma sayesinde biyogaz üretimi %50 oranında arttırılmaktadır. Anaerobik çamur çürütme sistemlerinde substratlar ve mikroorganizmalar arasındaki teması en iyi seviyeye çıkarmak için karışım koşulları optimize edilmelidir (Elalami ve ark., 2019).

#### **2.2.2.4. pH**

pH değeri, anaerobik çürütme işlemini büyük ölçüde etkileyen ana işletim faktörlerden biridir. Biyogaz üretim sürecinde, farklı optimum pH ayarlaması gerektiren çok sayıda mikroorganizmalar vardır. Anaerobik çamur çürütme proseslerinde azami biyogaz üretimi elde etmek için en uygun pH aralığı 6.8–7.2'dir (Appels ve ark., 2008). Anaerobik çürütmede, sistemde bulunan metan bakterileri pH değişimlerine karşı çok hassastır ve 7.0 civarında bir pH'ı tercih eder. Asit üreten mikroorganizmalar pH'a daha az hassastır ve 4.0-8.5 aralığında tolere edilebilir. Yine de, hidroliz ve asit üretimi için optimum pH 5.5 ile 6.5 arasındadır (Kwietniewska ve Tys, 2014; Hagos ve ark., 2017).

#### **2.2.2.5. Alkalinite**

Anaerobik çürütmede çamurun tamponlama kapasitesi alkalinite parametresi ile gösterilir. Anaerobik çürütme proseslerinde bulunan tampon maddelerden kalsiyum ve magnezyum gibi bikarbonatlar ham çamurda bulunurken, amonyum bikarbonatı ise proteinlerin parçalanmasıyla oluşur. Sistemde meydana gelen CO<sub>2</sub> ve UYA'yı

tamponlayarak ortamın pH'sını dengeler. İyi kurulmuş bir sistemde toplam alkalinite değeri 2000-5000mg/L aralığında değişim göstermektedir (Metcalf&Eddy., 2002). Alkalinite değerindeki düşme veya gaz içerisindeki CO<sub>2</sub> miktarının artışı, pH değerinin düşmeye başlamadan önce sistemin dengesinin bozulduğunu belirten bir ölçektir (Klein, 2002).

#### **2.2.2.6. Sıcaklık**

Sıcaklık, anaerobik çürütme işlemi sırasında mikroorganizmaların hayatta kalması için ana faktörlerden biridir. Anaerobik çürütücüde psikofilik (25°C), mezofilik (35°C) ve termofilik (55°C) olarak üç aralık kullanılabilir (Kwietniewska ve Tys, 2014). Mezofilik sıcaklıklar diğerlerine göre en sık kullanılır, optimum 33-40°C'dir. Bununla birlikte, mikrobiyal topluluklar için, mezofilik anaerobik çürütme süreci, hammadde bileşimi ve çalışma koşullarına duyarlıdır (Elalami ve ark., 2019). Mezofilik bakteriler, termofilik sıcaklık aralıklarında hayatta kalamazlar, oysa termofilik bakteriler, mezofilik sıcaklık aralıklarında hayatta kalabilirler, ancak büyüme hızları yavaştır (Schnurer ve Jarvis, 2010).

#### **2.2.2.7. Uçucu yağ asitleri (UYA)**

Anaerobik çürütme sistemlerinde UYA üreten bakteriler metan bakterilerine göre daha hızlı çoğalırlar ve bunun sonucunda da oluşan UYA'lar metana dönüşmeden sistemde asit birikimine sebebiyet verebilirler. UYA konsantrasyonunun değişmesiyle birlikte pH, alkalinite ve mikroorganizmaların sistemdeki etkileri değişir. Arıtma çamurların anaerobik olarak çürütülmesi sırasında UYA konsantrasyonunun 2000 mg/L'yi aşması durumunda, toksik etkilere sebep olacağı Hwu ve Lettinga (1997) tarafından bildirilmiştir.

#### **2.2.2.8. Nütrientler**

Anaerobik çürütme süreçlerinde organik maddelerin giderimi, yeni mikroorganizmaların üretimi ve buna bağlı olarak yüksek değerlerde biyogaz elde edilebilmesi için azot, fosfor gibi nütrientlerin anaerobik sistemde yeterli miktarda bulunması gerekir. Organik atıkların anaerobik çürütülmesi için optimum C/N oranı 20-35 değerindedir. C/N oranı düşük olduğunda, organik atığın anaerobik çürütülmesi, sisteme salınan serbest amonyakın içeriğinin artmasına neden olur (Khalid ve ark., 2011; Kwietniewska ve Tys, 2014). Geleneksel bir aktif çamur prosesi için C/N/P

oranları 100/5/1 iken anaerobik çamur çürütme sistemi için bu oranın 1/5-1/10'u kadar olması yeterlidir (Muhcu, 2012).

### 2.2.2.9. Toksikite

Anaerobik çürütmede her organik madde için konsantrasyon değeri sınırlıdır ve bu sınır aşımında işletimde toksik etki yaratarak zehirleyici olabilmektedir. Anaerobik çürütme sistemleri için amonyak, sülfür/sülfid, ağır metaller, oksijen, mineral iyonlar, kısa zincirli organik asitler ve diğer organik asitler mikroorganizmaların büyümelerini engelleyerek toksisiteye sebep olabilirler ancak iyi bir adaptasyon sonucu toksik maddelerin belirli konsantrasyonları anaerobik mikroorganizmalar tarafından tolere edilebilir (Hwu ve Lettinga, 1997; Khanal, 2011).

Amonyak ( $\text{NH}_3$ ) anaerobik bakteriler için önemli bir azot kaynağıdır ve düşük konsantrasyonlarda (<200 mg/L) anaerobik işletim için yararlıdır (Chen ve ark., 2008). Ancak artan  $\text{NH}_3$  konsantrasyonları sonucu metan bakterilerinin spesifik aktivitesinin azaldığı ve  $\text{NH}_3$  inhibisyonuna yol açtığı bulunmuştur (Khalid ve ark., 2011).

### 2.2.3. Anaerobik çürütmenin avantajları ve dezavantajları

Anaerobik çamur çürütme proseslerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. Anaerobik çürütme sistemi kullanılarak yapılan çalışmalara genel olarak bakıldığında, bu arıtma şeklinin avantajlarının dezavantajlarına üstün geldiğini görmek mümkündür. Anaerobik çürütmenin avantajları düşünüldüğünde tercih edilebilirliği yüksektir (Dicle, 2012).

**Çizelge 2.2.** Anaerobik çürütme prosesinin avantaj ve dezavantajları (Spinosa ve Vesilind, 2001)

Avantajları	Dezavantajları
Oluşan metan gazının kalorifik değeri yüksek olduğu için AAT'lerde enerji kaynağı değerindedir.	Yüksek yatırım maliyeti gerektirir (pompa, karıştırıcı, ısı değiştiriciler ve kompresörler ile donatılmış büyük ve ağız kapalı tanklar).
Üretilen enerji tesis içerisinde ısıtıcı ve karıştırıcı işlemlerinde kullanılabilir.	Metan bakterileri toksik maddelere ve çevre şartlarına karşı aşırı hassastırlar.
Ham çamurdaki katı madde %25-50 civarında giderilebilir.	Düşük organik madde içerikli atıkların çürütülmesinde ekonomik değildir
Çürütme sonrası oluşan çamur kokusuzdur, bozunmaya uğramadan depo edilebilir ve nihai haline gelen çamur toprak iyileştirici özelliindedir.	Çürütme sonrası oluşan üst faz suda askıda katı madde, çözünmüş ve partikül organik maddeler, azot, fosfor ve diğer bileşikler bulunmaktadır.
Bekletme süresi uzun olduğu için patojenlerin zararsız hale gelir.	Biyokütle gelişimi için adaptasyon evresi gereksinimi uzundur
İnşa alanı gereksinimi azdır ve işletme kontrolü gereksinimi en aza indirilebilir.	Sıcaklık düşüşlerinde kinetik hızı yavaşlar, sistemde ileri izleme ve kontrol gerektirir.

### **2.3. Çoklu Besiyeri Anaerobik Çürütme Proses Uygulamaları**

Çoklu besiyeri anaerobik çürütme, biyolojik olarak bozunabilir iki ve ya daha fazla atığın karıştırılarak elde edilen karışımın birlikte anaerobik çürütülmesi olarak tanımlanabilir.

Son yıllara kadar anaerobik çürütmedeki amaç hayvan gübresinden enerji üretimi, arıtma çamurlarının stabilizasyonu ve endüstriyel nitelikli askıda katı madde içeren veya içermeyen atıksuların nihai arıtımından önce anaerobik çürütülmesi gibi tek tür atıkların arıtılmasıydı. Ancak günümüzde anaerobik çürütmenin kısıtları ve olanaklarının daha iyi bilinmesi nedeniyle iki ve ya daha fazla farklı türden atıkların birlikte kullanılarak arıtılmış ve çoklu besiyeri anaerobik çürütme prosesi gelişen bir teknoloji haline gelmiştir. Bu prostedeki temel amaç, anaerobik olarak çürütülen hayvansal atıklar ve arıtma çamurları gibi esas atığın yanında ikinci bir besiyeri kullanılarak ortamdaki besin eksikliğini gidermek ve çürütme sonrası biyogaz verimini artırmaktır (Angelidaki ve ark., 2003).

Çoklu besiyeri ilavesi ile tamamlayıcı özelliklere sahip iki veya daha fazla substratın birlikte anaerobik çürütülmesi sonucu daha iyi bir besin dengesi, çürütücü performansı ve biyogaz verimi sağlaması beklenir. Bununla birlikte, besin enm dengesi gibi olumlu etki göstermesi, toksisiteye sebep olmaması ve CH<sub>4</sub> üretimini artırarak çürütme süresini azaltması bakımından çoklu besiyeri anaerobik çürütmede uygun substrat seçimi, çürütme performansı için çok önemlidir (Mata-Alvarez ve ark., 2011).

#### **2.3.1. Çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme prosesinde kullanılan atıklar ve uygulama alanları**

Anaerobik çamur çürütme prosesi, arıtma çamurlarının arıtılması için evrensel olarak kullanılan en uygun yöntemlerden biridir. AAT'lerde çürütücülerin çalışması genellikle maksimum biyogaz üretimi elde etmek için optimize edilmemiştir, çünkü çürütmedeki ana hedef çamur stabilizasyonudur (Arhoun ve ark., 2019). AAT'lerinin çamur çürütücülerin gerekenden daha büyük hacimlerde tasarlanması olası bir durumdur. Bu ekstra kapasiteden yararlanmak için, arıtma çamurlarının tamamlayıcı özelliklere sahip çoklu besiyeri ile birlikte çürütülmesi ilgi çekici bir seçenektir (Nghiem ve ark., 2017; Arhoun ve ark., 2019). Bu tür birlikte çürütme ayrıca gelişmiş bir besin dengesi ve C/N oranı, seyreltme yoluyla toksik maddelere bağlı inhibitör etkilerin hafifletilmesi ve geliştirilmiş metan üretimi sağlar (Hagos ve ark., 2017).

Arıtma çamurlarının biyogaz üretim oranlarını artırmak için farklı biyokütle ile çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme performansını araştıran bir dizi yayınlanmış makale bulunmaktadır (Mata-Alvarez ve ark., 2011; Cao ve Pawłowski, 2012; Prabhu ve Mutnuri, 2016; Nghiem ve ark., 2017; Shi ve ark., 2018; Pramanik ve ark., 2019). Bu çalışmalarda elde edilen nihai bulgular çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütmenin biyogaz üretim oranlarına katkı sağladığı ve gerçekte uygulanabilirliği yönündedir.

Çoklu besiyeri olarak kullanılabilen pek çok farklı biyokütle kaynağı mevcuttur. Bunlara örnek olarak kentsel alanlardan (örneğin kantinler ve restoranlar) gıda atıkları, gıda işlemeden elde edilen organik atıklar, marketlerden süresi dolmuş gıdalar, pazaryeri atıkları (sebze ve meyve), süt atıkları ve yağ-lipid içeriğine sahip atıklar verilebilir (Nghiem ve ark., 2017).

Arıtma çamurları, düşük C/N oranına sahiptir ve bu nedenle, çoklu besiyeri ile anaerobik çamur çürütülmesinde sistemin içerisine karbon açısından zengin gıda atıklarının eklenmesi, optimum C/N oranını sağlarken, biyogaz üretimini de artırır (Chakraborty ve ark., 2018). Bu durum, kolayca biyolojik olarak bozunabilen ve düşük alkalinite değerlerine sahip büyük bir organik madde konsantrasyonu olduğunu gösteren MSA'lar için daha çok geçerlidir (Nghiem ve ark., 2017).

### **2.3.2. Çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütmenin avantajları ve dezavantajları**

Biyogaz üretimini arttırmak için çamur ya tek başına çürütülebilir ya da diğer organik atık türleriyle karıştırılabilir. Çamura uygulanan bu ilave besiyeri birkaç avantaj sağlar. Yüksek biyogaz üretimi elde edilmesi, çoklu besiyeri anaerobik çürütmenin en önemli avantajıdır. Çamur için, çoklu substratın metan potansiyeli yeterince yüksekse, metan üretimi artabilir. Aynı zamanda C/N oranını dengeleyebilir. Çoklu besiyeri, birlikte çürütmede nem içeriğini, C/N oranını, besin dengesini ayarlar ve toksik bileşikleri seyreltir, inhibisyonu önler (Tandukar ve Pavlostathis, 2015; Astals ve ark., 2018). Ayrıca AAT'lerdeki biyogaz üretiminde mevsimsel dalgalanmaların önüne geçer ve düzenli olarak biyogaz üretimini sağlar. Akışkan karakterde olmayan atıklar, yoğunlaşmış atıklar, partiküler ya da şişmeye meyilli atıklar ve yüzebilen atıkların homojenliği sağlandıktan sonra seyreltilerek bu atıkların arıtma çamuru ile kullanılması anaerobik çamur çürütme prosesini verimli kılar. Böylece mevsimsel üretim proseslerinden gelen atıkların anaerobik çamur çürütmede kullanımları daha esnek hale gelerek, reaktöre aşırı yükleme engellenir ve parçalanma süresi sabit tutulur (Braun ve



Wellinger, 2003). İlave olarak anaerobik çürütme sonrası nihai çamur makul bir maliyetle tarımsal arazide gübre olarak kullanılmaktadır.

Genelde çoklu besiyeri ile anaerobik çamur çürütme prosesinin pek çok avantajı olmasına rağmen, mevcut AAT'lerde uygulanması ve entegrasyonu bakımından bazı dezavantajları da vardır. Çoklu besiyeri olarak kullanılacak biyokütle, farklı organik ve inorganik malzemelerin bir bileşimidir. Bu yüzden anaerobik çamur çürütücülerin çalışma ilkelerinden dolayı çoklu besiyeri ile çamurların birbirleriyle uyum problemleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yetersiz finansal teşvikler, biyogaz kullanım seçeneklerinin eksikliği, gıda atıklarının toplanması ve işlenmesi, biyo-katıların ve biyogazın sonraki işlemlerinde çürütmeye etkileri ve tasarım ve işletme deneyiminin eksikliği de diğer dezavantajlarından (Nghiem ve ark., 2017).

### **2.3.3. Yasal Yönetmelikler**

AAT'lerde oluşan çamurların anaerobik çürütülmesi sonucunda elde edilen stabilize çamur çeşitli yerlerde kullanılabilir. Örneğin; nihai çamur, toprağa verilebilir, yakılabilir, denize deşarj edilebilir veya karasal dolgu materyali olarak kullanılabilir (Uzun ve Bilgili, 2011). Azot ve fosfor içeriği bakımından zengin olan arıtma çamuru gübre özelliği kazanmasıyla bitki büyümesi için gerekli besin maddelerini karşıladığı için ticari bir öneme sahip olmaktadır. Çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme ile elde edilecek nihai çamur, ek besiyerinin bileşimine bağlı olarak çamura geçebilir ve stabilize çamurun özelliğinde değişim gösterebilir. Ayrıca stabilize çamurdaki organik madde içeriği, besi maddeleri, patojenler, metaller, toksik organik maddeler çamurun gübre olarak toprakta kullanımını etkileyen faktörlerdendir. Bu nedenle ülkemizde 27661 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan "Evsel Ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik'te belirtilen esaslara göre, stabilize çamurun gerekli şartları ve sınır değerleri sağlaması koşuluyla toprakta kullanılabilmesi belirtilmektedir (Resmi Gazete, 2010).

Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) ve üretilebilecek biyogaz miktarının 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir (ETKB). Biyokütle atıklarının büyük bir kısmı kentsel atıksu arıtma tesislerinden elde edilen arıtma çamurları ile organik içeriğe sahip gıda atıklarını oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması,

atıkların değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesi amacıyla Resmi Gazete’de yayımlanan “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” kapsamında biyokütle atık potansiyelinin yerli katkı ilavesi göz önünde bulundurulduğunda çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütmenin biyogaz üretiminin artırması ve dolayısıyla daha fazla elektrik üretilebileceği tahmin edilmektedir (Resmi Gazete, 2005).

#### **2.3.4. Konuya İlişkin Literatür Çalışmaları**

Literatürde arıtma çamurlarının biyolojik olarak parçalanabilirliği ve anaerobik arıtma sonucu oluşan biyogaz verimliliğini arttırmak amacıyla birlikte parçalanma yönteminin uygulandığı çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalarda arıtma çamurları ve meyve-sebze atıkların birlikte anaerobik çürütülmesi ile biyogaz üretiminin arttığı bildirilmiştir.

Arıtma çamurlarının organik içeriğe sahip belediye katı atıklarıyla hem tekli hem de ortak sindirim şeklinde iki ayrı sistemde sırasıyla 35-38 gün hidrolik bekletme sürelerinde, mezofilik (36°C) ve termofilik (56°C) koşullarda ve artan organik yüklemelerle anaerobik ortak sindiriminin araştırıldığı bir çalışmada, metan veriminin yalnızca arıtma çamuru veriminden %60 daha fazla olduğu ve arıtma çamurlarının organik atıklarla sırasıyla 75:25 karışım oranında en uygun olduğu gözlemlenmiştir (Sosnowski ve ark., 2003).

Atıksu arıtma tesislerinden alınan primer çamur ile belediye atıklarından meyve ve sebze atıklarının mezofilik (35°C) şartlarda normal karıştırma ve farklı yükleme oranlarıyla birlikte anaerobik çürütme performansı incelenmiş, PÇ:MSA karışımının 22:88 oranında 600-800 mL CH<sub>4</sub>/gUKM<sub>beslenen</sub> aralığında %58 UKM giderimi ile en iyi verim elde edilmiştir (Gomez ve ark., 2006).

Sebze atıklarının ve arıtma çamurunun birlikte anaerobik çürütme veriminin araştırıldığı 1.5 L aktif çalışma hacminde HBS 15 gün ve mezofilik şartlarda lab-ölçekli kesikli beslemeli çalışmada, arıtma çamuru ve sebze atıklarının 75:25 oranında karıştırılmasıyla SMÜ’nin 680 mL CH<sub>4</sub>/gUKM<sub>beslenen</sub> değeri ile %63-65 UKM verimiyle en iyi sonuçların elde edildiği gözlenmiştir (Anhuradha ve ark., 2007).

Gomez-Lahoz ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada meyve ve sebze atıklarının arıtma çamurları ile farklı karışım oranlarında 35°C’de birlikte anaerobik

sindirilmesiyle En yüksek metan üretimi, arıtma çamurları ve meyve-sebze atıklarının sırasıyla %50:%50 oranında karışımıyla 90 L CH<sub>4</sub>/kgUKM<sub>beslenen</sub> olarak elde edilmiştir.

Arıtma çamuru ve meyve sebze atıklarının ayrı ayrı ve belirli karışım oranlarında birlikte anaerobik arıtılmasıyla MSA'ların çoklu substrat kullanım stabilitesinin araştırıldığı çalışmada, atıksu arıtma tesisinden alınan SÇ ile MSA'nın 70:30 oranında karıştırılarak 35°C sıcaklıkta anaerobik çürütülmesi sonucu %85 UKM giderimi ve 610 mL CH<sub>4</sub>/gUKM<sub>beslenen</sub> değerinden metan üretimiyle en iyi verim elde edilmiştir (Bouallagui ve ark., 2009).

Arıtma çamurlarının anaerobik çürütmedeki metan verimini artırmak amacıyla, içinde meyve-sebze atıklarının da bulunduğu organik içeriğe sahip belediye atıklarıyla mezofilik (37°C) sıcaklıkta HBS 30 gün olacak şekilde tekli ve farklı karışım oranlarında birlikte anaerobik sindirimi incelenmiş ve birlikte anaerobik sindirim tekli sindirimle kıyaslandığında metan üretiminin, karışımda organik içeriğe sahip atıkların artan miktarıyla %18'den %47'ye yükseldiği görülmüştür (Cabbai ve ark., 2013).

Arıtma çamurlarının çürütülmesinde çoklu besiyeri olarak meyve atıkların kullanıldığı ve farklı meyve türlerinin sistemdeki performans değişiminin değerlendirildiği, HBS 20 gün, sıcaklık 37°C ve yarı sürekli reaktörde yürütülen çalışma sonucunda, değişen meyve atıklarının sistemdeki UYA, alkalinite ve metan üretiminde değişikliklere sebep olsa da kullanılan sekonder çamur ve meyve atığının 79:21 oranında karıştırılarak %110-190 UKM giderim verimiyle sistem artış yönünde değerler elde edilmiştir (Fonoll ve ark., 2015).

Arıtma çamurlarının stabilizasyonunda çoklu besiyerinin biyogaz eldesine etkisi bakımından meyve ve sebze atıkları ile anaerobik olarak çürütüldüğü ve meyve sebze atıklarının artan OYH'sine karşılık sistemdeki en etkin HBS'nin sabit 35°C'de araştırıldığı çoklu anaerobik çamur çürütme çalışması sonucunda artan OYH ile HBS'nin azaldığı ve maksimum metan üretimi 11 günlük HBS ile 2,1 kg VS/m<sup>3</sup>.gün olarak elde edilmiştir (Di Maria ve ark., 2015).

Kentsel AAT'den alınan karışık çamur ile meyve ve sebze atıklarının birlikte anaerobik olarak çürütülmesinin, MSA'ların mevsimsel değişimlerine bağlı olarak etkisi araştırmıştır. Dört farklı mevsimde toplanan MSA'lar ile KÇ'nin mezofilik koşullarda, OYH 5,8 g/L.gün, HBS 20 gün ve farklı karışım oranları ile çoklu besiyeri anaerobik çürütme yapılan çalışma sonucunda, KÇ'nin tekli anaerobik çürütülmesine kıyasla biyogaz üretimine katkısını yaz MSA ile çürütmede 10 kat, kış MSA ile çürütmede 4 kat daha fazla gerçekleşmiştir (Arhoun ve ark., 2019).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Ham Çamur ve Organik Atıkların Toplanması ve Karakterizasyonu

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında, arıtma çamurları ile sebze ve meyve karışımlarından oluşan pazaryeri atıkları kullanılmıştır. Arıtma çamurları; Konya Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi (AAT) ön çöktürme ünitesinden PÇ, biyolojik arıtım ünitesi geri devir hattından SÇ alınmış ve %60:40'luk (w:w) PÇ:SÇ karışımından KÇ hazırlanmıştır. Çamur fraksiyonlarının karakteristiği pH, iletkenlik, toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM) parametreleri ile Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Meyve ve sebze atıkları (MSA) Konya'da çeşitli pazar yerlerinden toplanmıştır. Aralık ayında toplanan MSA'lar çoğunlukla kış sebze/meyvelerini içermektedir. MSA tane boyutu <0,2 mm olacak şekilde öğütülerek sebze ve meyve ayrı olacak şekilde karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Homojen sebze ve meyve karışımlarının TKM ve UKM değerleri belirlenerek Çizelge 3.2'te verilmiştir. MSA'nın içeriği ve karışım numunesindeki % bileşen miktarı belirlenerek Çizelge 3.3'de sunulmuştur.

Ham çamur numunelerinden PÇ, TKM ve organik içerik olarak SÇ'a göre oldukça yüksek konsantrasyondadır. Bunun sebebi atıksudaki çökebilir maddelerin ham protein, yağ, karbonhidrat ve bakterilerin ön çöktürme ünitesinde PÇ olarak oluşmasıdır. SÇ ise atıksudaki çözünmüş organik maddeden biyolojik arıtımda oluşan bakteri flokları ve hücre dışı polimerlerden, ikincil çökeltme performansına/kabiliyetine göre düşük yoğunlukta oluşmaktadır. Meyve atığı organik içerik olarak en yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Sebze atığı da PÇ'den daha yüksek organik içerikte oluşmuştur.

Arıtma çamurları ve MSA'nın karakterizasyon analizleri yapıldıktan sonra özelliklerinin değişmemesi için arıtma çamurları +4°C', meyve-sebze atıkları da -18(-) 20°C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Ham çamur numunelerinin karakterizasyonu

Ham Çamur	pH	EC ( $\mu\text{c}/\text{cm} - \text{mS}/\text{cm}$ )	TKM (mg/L)	UKM (mg/L)
PÇ	6,26-7,02	1824 – 3,89	40000 – 75000	30000-50000
SÇ	6,41-7,20	1369 – 2,84	7000 – 20000	5000 – 15000

**Çizelge 3.2.** Sebze ve meyve atıklarının karakterizasyonu

Karışım Numunesi	TKM (mg/L)	UKM (mg/L)
SA	61120	54620
MA	144270	139890

**Çizelge 3.3.** Sebze ve meyve atıklarının % bileşen miktarları

<b>SEBZELER</b>			<b>MEYVELER</b>		
	Kütlesi (kg)	Atık Karışım Numunesindeki Bileşen Miktarı (%)		Kütlesi (kg)	Atık Karışım Numunesindeki Bileşen Miktarı (%)
Patates	0,424	12,1	Elma	0,540	15,4
Soğan	0,288	8,2	Portakal	0,492	14,1
Domates	0,364	10,4	Mandalina	0,452	12,9
Salatalık	0,248	7,1	Limon	0,308	8,8
Biber	0,124	3,5	Ayva	0,154	4,4
Havuç	0,272	7,8	Armut	0,300	8,6
Turp	0,176	5,0	Greyfurt	0,228	6,5
Karnabahar	0,204	5,8	Kivi	0,188	5,4
Brokoli Yaprağı	0,218	6,2	Muz	0,196	5,6
Marul	0,174	5,0	Nar	0,528	15,1
Pırasa	0,058	1,7	Cennet Hurması	0,114	3,3
Ispanak	0,064	1,8	<b>TOPLAM</b>	<b>3,5</b>	<b>100</b>
Yeşil Soğan	0,044	1,3			
Maydanoz	0,012	0,3			
Lahana	0,190	5,4			
Kara Lahana	0,078	2,2			
Patlıcan	0,258	7,4			
Bal Kabağı	0,304	8,7			
<b>TOPLAM</b>	<b>3,5</b>	<b>100</b>			

### 3.2. Yarı-Sürekli Anaerobik Reaktör Deney Düzenegi, İşletimi ve İzlenmesi

Çalışma, 2 L toplam hacme sahip özel yapım anaerobik cam reaktörlerde 1,5 L aşu anaerobik çamur ile kurulduktan sonra, PÇ, SÇ ve KÇ için HBS'yi sağlayacak şekilde kontrol için tek çamur ve diğere reaktörler için arıtma çamuruna ilaveten 0,585 g UKM/L.gün OYH'nda MSA ile beslenerek 30 gün boyunca 35°C sıcaklıkta adaptasyon süreci olarak işletilmiştir. İkincil besiyeri ilavesi ile çoklu anaerobik çürütülen reaktörlerde biyogaz üretimi belirlenmiş ve 30. günün sonunda tüm reaktörlerin çalışma hacmi 1 L'ye düşürülerek çalışmaya devam edilmiştir.

1 L çalışma hacminde 35°C sabit sıcaklıkta yarı-sürekli olarak beslenen kontrolleriyle birlikte toplam 6 reaktör, besleme sonrası günde iki kez elle çalkalanarak ilk 6 ay inkübasyonda kısıtlı karışım modunda çalıştırılmıştır (Şekil 3.1 a-b). Daha sonra çoklu çürütme yapılan reaktörler, anaerobik çürütmede karıştırıcının önemi açısından 3 manyetik karıştırıcı üzerine yerleştirilmiş camdan yapılmış ısıtmalı su banyosu sistemi içerisine alınarak 150 rpm'de sürekli karışimli olarak çalıştırılmıştır (Şekil 3.2).

Biyoreaktörler uygulanan arıtma çamurlarının OYH'ları HBS 20 gün ve sıcaklık 35°C şartında, PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 1,65, 0,40 ve 1,00 kg UKM/m<sup>3</sup>.gün olmuştur.

Reaktörlere beslenen MSA'nın içeriği ve oranları g UKM bazında kademeli olarak arttırılmıştır. Artan MSA, üç çamur fraksiyonu için % UKM bazında miktarları, isimlendirme ve uygulanan işletim süreleri Çizelge 3.4'de sunulmuştur. Faz 2<sup>1</sup>, Faz 2 ile 6 g sebze ile aynı besleme miktarına sahip olup, sistem kontrolü için tekrarlanmıştır.

Ham çamur ve MSA ile çoklu çürütme yapılan reaktörlere günlük besleme yapılmıştır. Gaz ölçümü yapıldıktan sonra beslenen reaktörler N<sub>2</sub> gazı ile gazlanarak, anaerobik ortam koşulları sağlanmıştır.

Çalışma, adaptasyon süreci dahil olmak üzere toplamda 305 gün sürmüştür. Her bir faz, kararlı hale ulaştığı durumlara bağlı olmak suretiyle yaklaşık 4-6 hafta işletilmiştir. Çoklu çürütmenin yapıldığı PÇ reaktöründe proses performansının düşüklüğünden dolayı 68. günden itibaren kontrol PÇ reaktörü çoklu çürütme reaktörü olarak işletilmiş ve PÇ kontrol olarak yeniden kurulmuştur. Çalışmanın 129. gününde çoklu çürütme yapılan reaktörler sürekli karıştırma moduna geçirilmiştir. Bu nedenle Faz 3, SÇ ve KÇ için yaklaşık 2 HBS süresinde çalıştırılarak sistem performansına karıştırıcının etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. MSA'nın artan, ayrı ve birleşik beslemeleri arasındaki proses performans özellikleri incelenmiştir.

Günlük metan üretimi ölçülmüş ve alınan çıkış/stabilize çamur numunelerinde pH, iletkenlik, uçucu yağ asitleri (UYA), bikarbonat, TKM ve UKM analizleri ile sistem performansındaki değişim kontrol reaktörleri ile paralel olarak izlenmiştir. Ayrıca belirli dönemlerde reaktörlerden alınan stabilize çamurda toplam azot (TN), toplam fosfor (TP) ve susuzlaştırma analizleri yapılmıştır.

SMÜ (SMÜ) değerleri (mL metan/g UKM<sub>beslenen</sub>-gün), tüm reaktörlerde günlük üretilen metanın (mL) her bir çamur fraksiyonu için reaktörlere beslenen biyokütle konsantrasyonuna (g UKM<sub>beslenen</sub>) bölünmesiyle elde edilmiştir.





Şekil 3.1. (a) Kontrol (b) MSA ile beslenen reaktörlerin kısıtlı karışım inkübasyonu





Çizelge 3.4. Yarı sürekli anaerobik çoklu çamur çürütme süreçlerinin isimlendirilmesi ve işletim özellikleri

Reaktör Hacmi (mL)	İsimlendirme	MSA İçeriği	Reaktörlere Eklenen MSA		AÇ ve MSA'nın Karışımı						İşletim Süresi (gün)	Karışım Özelliği		
			Miktar (g TKM)	OYH (g UKM/L.gün)	OYH <sub>AÇ+MSA</sub> (g UKM <sub>beslenen</sub> /L.gün)	MSA:AÇ (w:w)	PÇ	SÇ	KÇ	PÇ			SÇ	KÇ
1500	Faz 1	MSA	6 (3+3)	0,59	2,23	0,99	1,59	0,36	1,46	0,58	30	30	30	Kısıtlı karışım
	Faz 1	MSA	6 (3+3)	0,59	2,23	0,99	1,59	0,36	1,46	0,58	20	20	20	Kısıtlı karışım
	Faz 2	SA	6	0,33	1,98	0,73	1,33	0,20	0,82	0,33	58	36	36	Kısıtlı karışım
1000	Faz 3	MA	6	0,84	2,49	1,24	1,84	0,51	2,09	0,84	49	71	71	Sürekli karışım
	Faz 4	MA	12	1,68	3,32	2,08	2,68	1,02	4,19	1,67	41	41	41	Sürekli karışım
	Faz 5	MSA	12 (6+6)	1,17	2,82	1,57	2,17	0,71	2,92	1,16	42	42	42	Sürekli karışım
	Faz 6	SA	12	0,66	2,32	1,06	1,66	0,40	1,64	0,66	10	10	10	Sürekli karışım
	Faz K.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	14	14	Sürekli karışım
	Faz 2 <sup>1</sup>	SA	6	0,33	1,98	0,73	1,33	0,20	0,82	0,33	24	24	24	Sürekli karışım
	Faz 7	SA	8	0,44	2,09	0,84	1,44	0,27	1,10	0,44	17	17	17	Sürekli karışım

### 3.3. Analitik Yöntemler

Aritma çamurları ve meyve-sebze atıkları pH, elektriksel iletkenlik (EC), TKM ve UKM konsantrasyonları ile karakterize edilmiştir.

pH, WTW pH315i marka pH metre ve EC, WTW inoLab Cond7110 marka iletkenlik ölçer ile belirlenmiştir.

TKM (2540.B) ve UKM (2540.E) 105°C'de kurutma ve 550°C'de yakma sonrası tartım yöntemlerine göre standart metotlarca belirlenmiştir (APHA, 2005).

UYA ve bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) konsantrasyonları , Anderson ve Yang (1992)'ın 2 noktalı titrasyon metodu ile belirlenmiştir.

Çıkış stabilize çamurların susuzlaşma özelliği (2710 H) (Time-to-filter) standart metodu ile gerçekleştirilmiştir (APHA, 2005).

Stabilize edilmiş (her faz için işletim süresi sonunda çürütücüden alınan çıkış) çamurlardaki nütrient içeriğinde TN Koroleff Sindirimi (Peroksodisülfat) ve 2,6 Dimetilfenol ile Fotometrik Saptama (Hach Lange LCK 338) ve TP (Fosformolibden Mavisi Metodu Hach Lange LCK 350) kullanılarak spektrofotometrik yöntemle belirlenmiştir.

Metan üretimi günlük olarak izlenmiş ve üretilen metan gazı Şekil 3.3'te görüldüğü gibi 0,1 N NaOH çözeltisinden geçirilerek, alkali sıvı-gaz yer değiştirme metoduyla (2720 A-B) doğrudan ölçülmüştür (APHA, 2005).



Şekil 3.3. Reaktörlerde oluşan metanın ölçümü

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

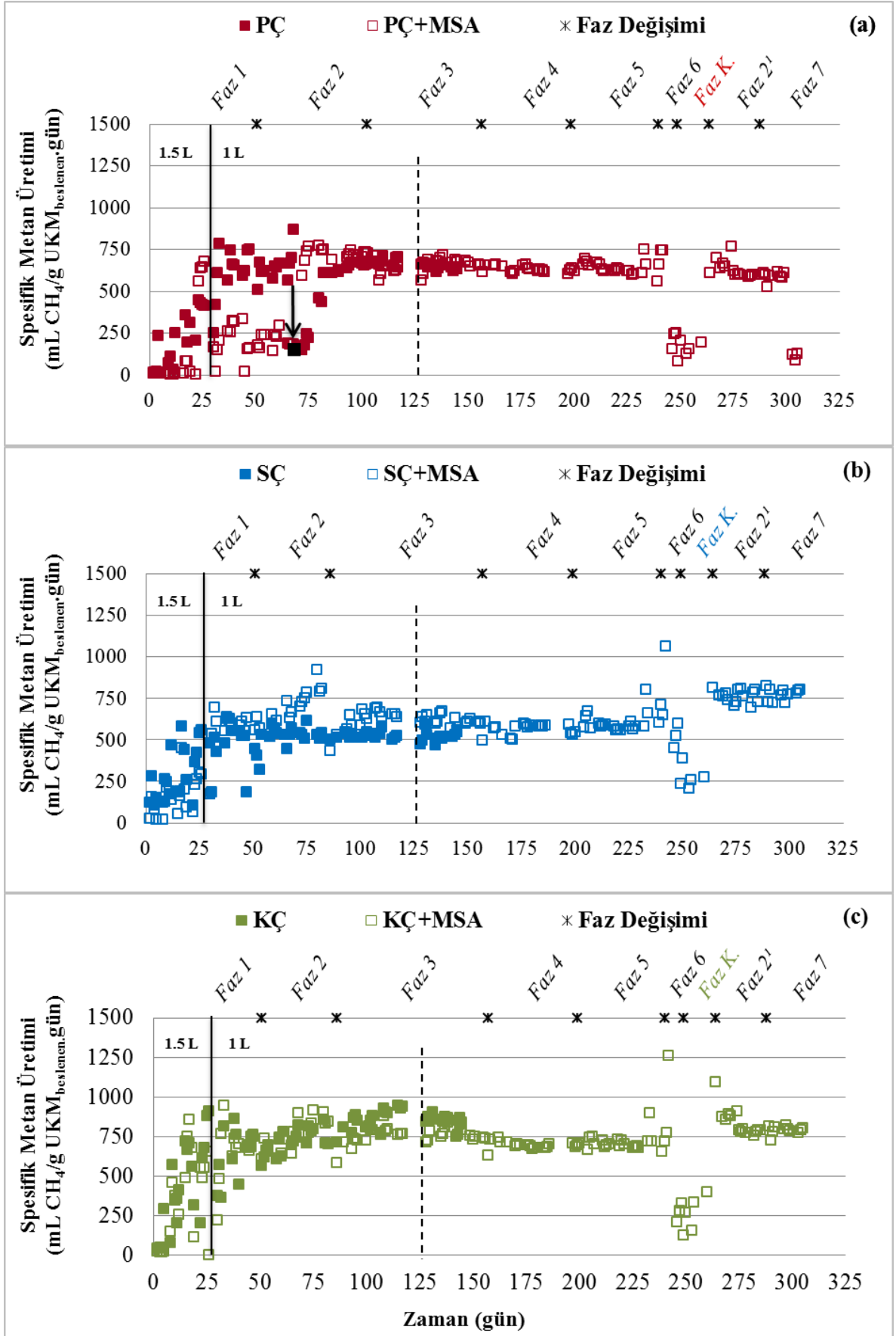
Yapılan yüksek lisans tez çalışmasında MSA'nın öğütüldükten sonra meyve ve sebze olarak ayrı ve birleşik şekilde ham PÇ, SÇ ve KÇ yanında ikincil besiyeri olarak yarı-sürekli anaerobik çamur çürütücülere beslenmesi ile elde edilecek metan gazı üretim potansiyeli ve UKM giderimi gibi proses performans parametrelerine etkisine ilaveten oluşacak stabilize çamur özellikleri bakımından karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. 7 farklı fazda yürütülen çalışmanın sonuçları, farklı ayrışabilirlik özelliklerine sahip PÇ ve SÇ çürütmesi için MSA ilaveli mevcut ve ayrık anaerobik çürütme modelleri için proses fizibilitesinin ve çıkış/stabilize çamur kalitesinin belirlenmesine yönelik olarak değerlendirilmiştir.

### 4.1. Yarı-Sürekli Anaerobik Çürütme Sonuçları

#### 4.1.1. Spesifik metan üretimi (SMÜ)

Reaktörlerdeki SMÜ değerlerinin zamana bağlı değişimi her işletim şartı için PÇ, SÇ ve KÇ'nin kontrol reaktörleri ile paralel olarak Şekil 4.1 a-c'de gösterilmiştir. Reaktörlere çoklu besiyer ilavesinin yapıldığı her bir faz grafik üzerinde belirtilerek sistemin kısıtlı karıştırmadan sürekli karışımli moda geçtiği gün kesikli çizgi ile gösterilmektedir. PÇ+MSA beslenen reaktörde oluşan düşük performanstan dolayı PÇ kontrol reaktörü PÇ+MSA reaktörüne dönüştürülerek çalışma devam ettirilmiştir (siyah ok).

Çalışma boyunca kontrol reaktörlerinde en yüksek SMÜ verimi  $790 \pm 150$  mL  $\text{CH}_4/\text{g}$   $\text{UKM}_{\text{beslenen}} \cdot \text{gün}$  ile KÇ reaktöründe elde edilmiştir. PÇ ve SÇ reaktörlerinde elde edilen SMÜ ise sırasıyla  $650 \pm 100$  ve  $500 \pm 120$  mL  $\text{CH}_4/\text{g}$   $\text{UKM}_{\text{beslenen}} \cdot \text{gün}$  değerlerindedir. 148. çalışma gününde kararlı ve stabil hale gelen üç çamur fraksiyonunun kontrol reaktörlerinde analiz ve ölçümler sonlandırılmıştır (Şekil 4.1 a-c). Beklenenin tersine PÇ'un KÇ çürütmesinden daha düşük seviyede SMÜ oluşturması OYH'nın yüksek seviyede uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Anaerobik çamur çürütme prosesinde organik içeriği oluşturan maddelerin yavaş ayrışır nitelikte olması yüksek OYH'de SMÜ'ni kısıtlayan en önemli faktördür. SÇ çürütmesinin en düşük SMÜ değerini vermesi beklenen bir sonuçtur çünkü SÇ içeriğinin zor ve kısıtlı ayrışabilirliğinin bir göstergesidir.



Şekil 4.1. PÇ (a), SÇ (b) ve KÇ (c) reaktörlerinin SMÜ değerlerinin zamana bağlı değişimi

PÇ reaktörlerindeki metan veriminin zamana bağlı değişimi incelendiğinde PÇ+MSA reaktöründe Faz 1 ve Faz 2 işletimi sürecinde kontrol reaktörüne kıyasla beklenen değerlerin altında metan üretimi gözlenmiştir (Şekil 4.1 a). Bu sebeple Faz 2 işletiminden itibaren çoklu besiyer ile çürütme yapılan PÇ+MSA reaktörü yerine, sistem performansı kararlı olan kontrol PÇ reaktörü kullanılmaya başlanmıştır. Kontrol PÇ reaktörü yeni aşı ile tekrar kurulmuş ve SMÜ  $660 \pm 50$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> değeri ile kısa sürede kararlı hale ulaşmıştır.

Faz 1’de PÇ+MSA reaktöründeki metanojenlerin inhibe olmasından dolayı 0,59 g UKM-MSA/L.gün OYH’ndaki 6 g MSA’nın (3+3) metan dönüşümüne katkısı belirlenememiştir. Diğer işletim şartlarındaki SMÜ değerleri ise Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7 için sırasıyla  $730 \pm 50$  (6 g SA),  $680 \pm 40$  (6 g MA),  $630 \pm 30$  (12 g MA),  $650 \pm 50$  (12 g MSA),  $640 \pm 50$  (6 g SA) ve  $600 \pm 20$  (8 g SA) mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> olarak elde edilmiştir. 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH’nda 6 g SA ile beslenen Faz 2’den 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH’ndaki 6 g MA ile beslenen Faz 3’e geçilmesiyle SMÜ verimindeki %7 azalma görülmüştür ve bu durum, MA’nın daha yüksek katı madde içeriğine sahip olup anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliğinin SA’na göre daha düşük olması ile ilgilidir. Benzer sonuç Faz 4’te 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH’ndaki 12 g MA beslemesinde 2 kat artışa rağmen SMÜ’nde düşüş olarak gerçekleşmiştir. Bunun sebebi artan MA miktarına bağlı olarak sistemde UKM birikmesidir. 1,17 g UKM-MSA/L.gün OYH’nda 12 g MSA beslenen Faz 5’te sistemde SA’nın oluşu daha düşük katı madde içeriğine ve daha yüksek ayrışabilirliğe sahip olduğundan SMÜ verimi Faz 4’e göre %3 artış göstermiştir. 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH’nda 12 g SA beslemesinin yapıldığı Faz 6’da SA’nın artan miktarı reaktörde toksik etki oluşumuna neden olmuştur ve SMÜ’ne katkısı belirlenememiştir. SA yarıya düşürülerek (6 g) 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH’nda çürütme işlemi devam eden Faz 2<sup>1</sup>’den elde edilen SMÜ değerinin aynı OYH’nda SA beslenen Faz 2’ye göre %12 daha düşük elde edilmesi önceki toksisiteden tam olarak geri dönülemediğini yani canlılık kaybı gerçekleştiğini göstermektedir. 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH’nda 8 g SA beslenen Faz 7’de de işletimin 14. gününde SMÜ verimi düşerek sistemin dengesinde bozulma meydana gelmiştir.

PÇ+MSA reaktöründen elde edilen değerler kontrol PÇ reaktörü ile kıyaslandığında SMÜ verimi Faz 2 ve Faz 3’te sırasıyla %12 ve %5 daha fazla gerçekleşmiş olup, diğer fazlardan elde edilen verim kontrol reaktörü ile eşdeğerdir. Burada en yüksek SMÜ veriminin %12 daha fazla olarak 0,33 g UKM-SA/L.gün

OYH'nda 6 g SA beslenen Faz 2 işletiminden elde edilmesi, SA'nın ayrışabilirliğinin MA'ya göre daha yüksek olması ve çoklu anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliğin artırması şeklinde açıklanabilir. Sonuç olarak PÇ'un tüm faz işletimleri değerlendirildiğinde en iyi verim 6 g SA (OYH 0,33 g UKM-SA/L.gün) beslemesinde elde edilmiştir ve maksimum değer  $730 \pm 50$  mL  $CH_4/g$  UKM<sub>beslenen</sub>.gün olarak belirlenmiştir.

SÇ reaktörlerindeki SMÜ'nin zamana bağlı değişimi tüm Faz işletimleri için Şekil 4.1 b'de gösterilmektedir. Reaktörde uygulanan farklı işletim şartlarına göre SMÜ değerleri Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7'de sırasıyla  $590 \pm 40$  (6 g MSA),  $700 \pm 150$  (6 g SA),  $630 \pm 70$  (6 g MA),  $575 \pm 20$  (12 g MA),  $620 \pm 50$  (12 g MSA),  $760 \pm 60$  (6 g SA) ve  $775 \pm 55$  (8 g SA) mL  $CH_4/g$  UKM<sub>beslenen</sub>.gün olarak PÇ çürütmesi ile paralellik göstermiştir. Faz 1'de 0,59 g UKM-MSA/L.gün OYH'nda 6 g MSA ilavesiyle elde edilen SMÜ verimi 1,17 g UKM-MSA/L.gün OYH'nda 12 g MSA beslenen Faz 5 ile kıyaslandığında %5 daha az verimle sonuçlandığı, OYH artan MSA'nın çoklu anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliği artırarak SMÜ verimine artış yönde etki gösterdiği görülmektedir. 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA ile beslenen Faz 2 ve Faz 2<sup>1</sup> ile 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 8 g SA beslenen Faz 7 kıyaslandığında elde edilen SMÜ değerleri birbirine yakın olmakla birlikte 8 g ilavesinde %3 daha fazla gerçekleşmiştir. 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 12 g SA beslenen Faz 6'da artan SA miktarının sistemde oluşturduğu toksik etki sebebiyle 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH'ndaki SA'nın SMÜ'ne katkısı belirlenememiştir. Faz 3'te 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 6 g MA beslenerek işletilen SÇ reaktörü Faz 4'te 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'na 12 g MA olarak artırılmış ancak beklenenin aksine 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'nda %9-10 daha fazla SMÜ verimiyle sonuçlanmıştır. MA'nın OYH'nın artmasına karşılık daha düşük SMÜ oluşması, MA'nın yüksek organik içeriğe sahip olması ve artan besleme sonucu yavaş ayrışarak SMÜ'ni kısıtlaması ile açıklanabilir. Tüm faz işletimlerinden elde edilen SMÜ verimlerine bakıldığında SA beslenen fazlardaki (Faz 2, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7) SMÜ'nin MA ve MSA beslenen diğer fazlara göre daha yüksek değerlerde gerçekleştiği, bu durumda SA'nın çoklu anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliğinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

SÇ+MSA reaktöründeki tüm faz işletimleri kontrol reaktörüyle kıyaslandığında, Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7 için sırasıyla %18, %40, %26, %15, %24, %52 ve %55 daha fazla SMÜ verimi elde edilmiştir. Kontrol SÇ'a göre %55 daha fazla SMÜ'ne sahip olan Faz 7'nin (OYH 0,44 g UKM-SA/L.gün) tüm işletimler

arasında en iyi ve kararlı olduğu görülmektedir ve optimum SMÜ verimi  $775 \pm 55$  mL  $\text{CH}_4/\text{g UKM}_{\text{beslenen-gün}}$  olarak belirlenmiştir.

KÇ reaktörlerindeki SMÜ'nin zamana bağlı değişimi her Faz için Şekil 4.1 c'de gösterilmektedir. Reaktörde uygulanan farklı işletim şartlarına göre SMÜ değerleri Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7'de sırasıyla  $700 \pm 220$  (6 g MSA),  $750 \pm 150$  (6 g SA),  $790 \pm 90$  (6 g MA),  $700 \pm 20$  (12 g MA),  $720 \pm 40$  (12 g MSA),  $800 \pm 20$  (6 g SA) ve  $830 \pm 80$  (8 g SA) mL  $\text{CH}_4/\text{g UKM}_{\text{beslenen-gün}}$  olarak elde edilmiştir. MSA'nın OYH Faz 1'de 0,59 g UKM-MSA/L.gün ve 6 g iken Faz 5'te 1,17 g UKM-MSA/L.gün ve 12 g şeklinde artırılarak beslenmiş ve SMÜ veriminde değişiklik gözlemlenmemiştir. 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA ile beslenen Faz 2 ve Faz 2<sup>1</sup>'den elde edilen SMÜ değerleri 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 8 g SA beslenen Faz 7 ile kıyaslandığında %7 daha az verimle sonuçlanmıştır. OYH artan SA beslemesi ayrışabilirliği artırarak SMÜ veriminin artması şeklinde gerçekleşmiştir. OYH 0,66 g UKM-SA/L.gün değerine çıkarılarak 12 g SA beslenen Faz 6 işletiminde ise beklenenin aksine sistemde oluşan toksik etki sebebiyle verim düşmüş ve artan SA'nın SMÜ üzerinde kısıtlayıcı etkisi olduğu görülmüştür. Faz 3'te 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 6 g MA beslenmesi ile Faz 4'te 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 12 g MA beslenmesi sonucu elde edilen SMÜ değerleri karşılaştırıldığında, Faz 4'teki artan MA'nın Faz 3'e göre %11-12 daha düşük SMÜ verimine sahip olduğu görülmüştür. Burada MA'nın yüksek OYH'nda beslenmesi sonucu anaerobik çamur çürütmede yavaş ayrılarak SMÜ oluşumuna kısıtlayıcı yönde etkisi olduğu söylenebilir.

KÇ+MSA reaktöründen elde edilen değerler kontrol KÇ reaktörü ile kıyaslandığında SMÜ verimi Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7'de sırasıyla %1-3 ve %5 daha fazla gerçekleşmiş olup, diğer fazlardan elde edilen verim kontrol reaktörü ile eşdeğerdir. Burada en yüksek SMÜ veriminin %5 daha fazla olarak 0,44 g UKM/gün OYH'nda 8 g SA beslenen Faz 7 işletiminden elde edilmesi, SA'nın ayrışabilirliğinin MA'ya göre daha yüksek olması ve çoklu anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliği artırması şeklinde açıklanabilir. Sonuç olarak KÇ'un tüm faz işletimleri kontrol reaktörüyle kıyaslandığında, %5 daha fazla verimle Faz 7 (OYH 0,44 g UKM-SA/L.gün), sistemin daha kararlı ve sınırlı aralıkta olması bakımından ise Faz 2<sup>1</sup> (OYH 0,33 g UKM-SA/L.gün) olduğu ve buradaki optimum değer  $810 \pm 20$  mL  $\text{CH}_4/\text{g UKM}_{\text{beslenen-gün}}$  olarak belirlendiği söylenebilir.

Faz 6 işletimi başladıktan sonra üç çamur fraksiyonunda da SMÜ yükselmiş, sonra ani bir düşüş gerçekleşerek sistemin dengesinde bozulma meydana gelmiştir. 0,66

g UKM-SA/L.gün OYH'nda 12 g SA beslemesinin yapıldığı Faz 6, tüm fazlar içinde en kötü performansı göstermiştir. Bu işletmede reaktörlerde oluştuğu kabul edilen toksisite etkisi üç çamur fraksiyonu için de SMÜ'ni etkilemiş, geniş aralıkta salınım göstererek kararsız davranış sergilemiştir. Faz 6'nın başlamasıyla üç çamur fraksiyonu için de sistem performansının bozulması, reaktörlere beslenen SA'nın artan OYH'ndan kaynaklandığını göstermektedir Çünkü sebze atıklarının bileşimde yeşil yapraklı atıkların oranı fazladır. Meyve atıkları bileşiminde %0,2-1 azotlu maddeler bulunurken sebze atıklarının içerisindeki azotlu maddelerin oranı %1-3'tür (Yaralı, 2017). Azotlu maddeler anaerobik çürütme sistemlerinde yeterli miktarda olması gereken bir besin maddesidir ancak mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğundan daha fazla bulunması sistemde serbest amonyak içeriğinin artması ve dolayısıyla toksik etki ile sonuçlanabilir (Kwietniewska ve Tys, 2014). Yükselen pH'nın etkisi ile reaktörlerde serbest amonyak konsantrasyonunun artmış olması muhtemeldir. Ispanak, marul, turp, kırmızı pancar, semizotu, pazı, karalahana ve pırasa gibi sebze atıklarının 600-4000 mg/kg olarak yüksek miktarda nitrat içeriğine sahip olduğu bildirilmiştir (Gökalp, 1983). Nitrit ve nitrat elektron alıcı olarak metanlaşmada kullanılan asetatı tüketerek metan üretimini düşürebilir, fakat Faz 6 işletiminde UYA birikimi bu oluşumu çürütmekte ve bozulan performansın sebebi olarak, kış dönemi sebze atıklarının çoğunun yüksek azot içeriği sebebiyle artan miktarda yükleme ile üç çamur fraksiyonunda da yüksek pH ortamında açığa çıkan serbest amonyak gösterilebilir.

Çoklu anaerobik çamur çürütme yapılan reaktörlerde en iyi SMÜ verimi PÇ için 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA'ndan, SÇ ve KÇ için 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 8 g SA beslemesinden elde edilmiştir. Genel sonuçlara bakıldığında SA SMÜ verimi üzerinde MA ve MSA'ya göre daha etkili gerçekleşmiştir. Kontrol reaktörlerine göre artan SMÜ verimi ayırık sistem olarak üç çamur fraksiyonu için değerlendirildiğinde, PÇ+SA ve KÇ+SA'na kıyasla %55 daha fazla SMÜ elde edilen SÇ+SA'da gerçekleşmiştir.

Yapılan çalışmada MSA ile çoklu anaerobik çamur çürütmesi yapılan reaktörlerden elde edilen SMÜ sonuçlarını literatürle kıyasladığımızda; Gomez ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada PÇ ile MSA atıklarının anaerobik çürütülmesi sonucu 600-900 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen</sub>.gün aralığında elde ettiğini ve mevcut çalışmadaki PÇ reaktörü için elde edilen SMÜ açısından uyumlu olduğunu göstermektedir. Bouallagui ve ark. (2009), arıtma çamuru olarak SÇ ve çoklu besiyeri MSA atıklarının birlikte mezofilik şartlarda kesikli anaerobik olarak çürütme performansı araştırdıkları



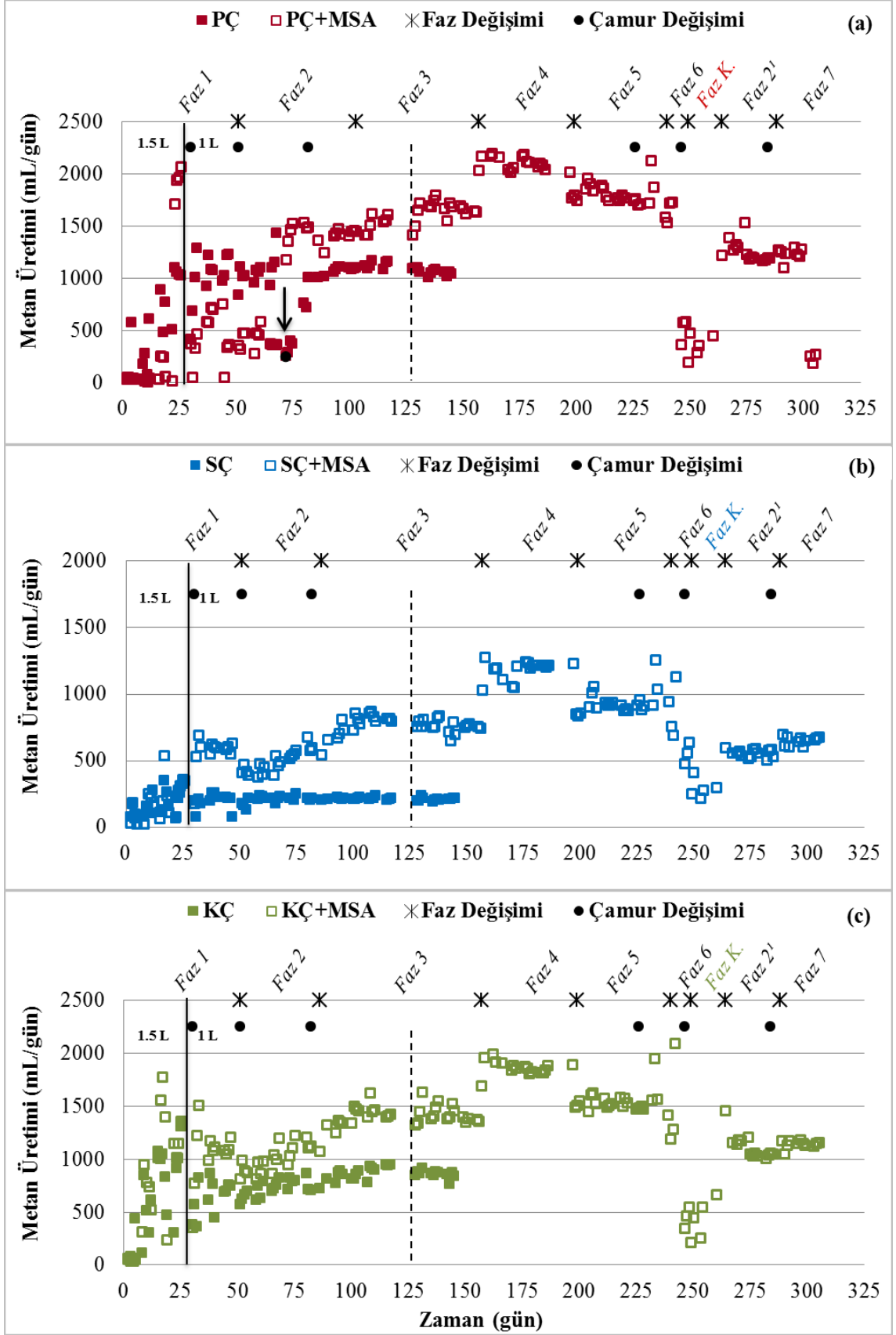
çalışmasından SMÜ 610 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> olarak bu çalışmadaki SÇ reaktörü için elde edilen SMÜ yakın bir değer bulunmuş ve çalışmayla uyum sağlamıştır. Sosnowski ve ark. (2003)'nin yaptığı çalışmada arıtma çamuru sadece KÇ fraksiyonunda kullanılmış ve mezofilik şartlarda 3,084 g UKM/gün OYH'nda MSA ile anaerobik çürütülmesinden 532 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> değerinde SMÜ elde edilmiştir. Bu çalışmada KÇ için daha düşük OYH'nda SMÜ açısından daha iyi verim elde edilmiştir.

#### 4.1.2. Günlük metan üretimi

Reaktörlerin günlük metan üretimi PÇ, SÇ ve KÇ için kontrolleri ile paralel olarak Şekil 4.2 a-c'de gösterilmiştir. Aktif çalışma hacminin 1.5 L'den 1 L'ye düşürülmesiyle reaktörlerden elde edilen günlük metan üretim değerleri düşmüş, sonrasında yeni çalışma hacminde sistemde denge sağlanarak kararlı hal elde edilmiştir. Çalışma boyunca kontrol reaktörlerindeki günlük metan üretimi PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 1080±120, 205±50 ve 760±190 mL CH<sub>4</sub>/gün şeklinde gerçekleşmiş ve günlük metan üretimi en fazla PÇ olmak üzere üç çamur fraksiyonu için PÇ>KÇ>SÇ olarak beklenen şekilde azalan sıra elde edilmiştir.

MSA ilavesi yapılan reaktörlerdeki günlük metan üretimi kontrol reaktörlerine kıyasla üç çamur fraksiyonunda da artış göstermiştir. Ancak OYH 0,66 g UKM-SA/L.gün olarak 12 g sebze beslemesi ile Faz 6 işletimi başladıktan sonra sistemde meydana gelen toksik etki nedeniyle günlük metan üretimi üç çamur için de kararsız ve dağınık gerçekleşmiştir. Tüm işletim şartlarından (Faz 6 hariç) elde edilen günlük metan üretim değerleri şöyledir:

- PÇ için, Faz 1 işletim şartında reaktördeki metan üreten bakterilerin inhibe olmasından dolayı 0,59 g UKM-MSA/L.gün OYH'nda 6 g MSA beslemesinin günlük metan üretimine katkısı belirlenememiştir. Diğer işletim şartlarındaki günlük metan üretim değerleri ise Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7'de sırasıyla 1400±130 (6 g SA), 1640±150 (6 g MA), 2100±90 (12 g MA), 1775±180 (12 g MSA), 1200±50 (6 g SA) ve 1210±80 (8 g SA) mL/gün olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2 a)
- SÇ için, Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7'de sırasıyla 605±75 (6 g MSA), 490±90 (6 g SA), 770±100 (6 g MA), 1195±80 (12 g MA), 950±100 (12 g MSA), 555±40 (6 g SA) ve 650±40 (8 g SA) mL/gün değerlerinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.2 b)



Şekil 4.2. PC (a), SÇ (b) ve KÇ (c) reaktörlerinde günlük metan üretimi (*kesikli çizgiler meyve/sebze ile beslenen reaktörlerin tam karıştırmalı sisteme geçtiğini göstermektedir.*)

• KÇ için, Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7<sup>1</sup> de sırasıyla 1070±140 (6 g MSA), 1010±200 (6 g SA), 1440±195 (6 g MA), 1855±40 (12 g MA), 1535±90 (12 g MSA), 1120±90 (6 g SA) ve 1150±50 (8 g SA) mL/gün olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2 c)

Tüm işletim şartları birbiri arasında kıyaslandığında günlük metan üretimine katkısı diğerlerine göre en iyi olan işletimin üç çamur fraksiyonu için de OYH 1,68 g UKM-MA/L.gün olarak 12 g MA beslemesi yapılan Faz 4 işletimi olduğu görülmektedir.

MSA, MA ve SA'nın anaerobik çamur çürütmede günlük metan üretimine katkısı artış yönünde gerçekleşmiştir. Burada ikincil besiyer olarak kullanılan atıkların OYH'ları artırıldığında metan üretimine katkısı artmakla birlikte artan OYH'nda beklenenin aksine daha düşük seviyelerde metan üretimi elde edilmiştir. Bu da her bir atığın farklı OYH'larından elde edilen SMÜ değerinin üç çamur fraksiyonuna bağlı olarak farklı olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.1).

Reaktörlere 0,59 g UKM-MSA/L.gün OYH'nda beslendiğinde sadece MSA'ndan gelen SMÜ değerleri OYH 1,17 g UKM-MSA/L.gün olarak artırıldığında MSA'dan gelen SMÜ değerlerine yaklaşık eşit olup, SÇ için %8 daha az, KÇ için %24 daha fazla gerçekleşmiştir. Artan OYH etkisi MSA için KÇ reaktöründe daha iyi etki göstermiştir.

OYH 0,84 g UKM-MA/L.gün değerinde yapılan beslemede sadece MA'dan gelen metan üretimi 1,68 g UKM-MA/L.gün olarak beslendiğinde MA'dan elde edilen metan üretiminden üç çamur fraksiyonu için de daha düşük olup SMÜ değerleri PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla %11, %13-14 ve %20 daha az seviyelerde gerçekleşmiştir. Bunun sebebi, OYH'nın yüksek olmasıyla birlikte MA'nın yavaş ayrışabilir nitelikte olmasıdır.

SA'nın 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda beslenmesi sonucu sadece SA'ndan gelen SMÜ değeri 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda beslendiğinde elde edilen SMÜ ile kıyaslandığında, PÇ için düşük OYH'nda %62 daha fazla, SÇ ve KÇ için ise yüksek OYH'nda %17-18 daha fazla metan üretimi elde edilmiştir. Bu durum SA'nın kısıtlı olmakla birlikte artan OYH'nda ayrışabilirliğinin yüksek olması şeklinde açıklanabilir.

Sadece MSA, MA ve SA'ndan elde edilen SMÜ değerleri birbiri ile kıyaslandığında en yüksek seviyedeki SMÜ'nin SA'nda olduğu görülmektedir. Bu durumda MSA ve MA'ya göre SA'nın ayrışabilirliğinin daha yüksek olduğu ve SMÜ üzerinde daha etkili gerçekleştiği söylenebilir.

**Çizelge 4.1.** MSA, MA ve SA'na özel SMÜ değerleri

Reaktör	SMÜ <sub>MSA</sub> (mL CH <sub>4</sub> /g UKM <sub>beslenen</sub> .gün)					
	MSA		MA		SA	
	0,59*	1,17*	0,84*	1,68*	0,33*	0,44*
PÇ	-	598	702	625	1061	398
SÇ	684	632	679	589	848	1000
KÇ	530	658	810	655	758	886

\* g UKM/gün

Çoklu besiyeri anaerobik çamur çürütme ayırık sistem olarak düşünüldüğünde, günlük metan üretimindeki artış kontrolüne kıyasla en iyi SÇ reaktöründe etki göstermiş olup, üç çamur fraksiyonu için SÇ>KÇ>PÇ şeklinde gerçekleşmiştir.

MSA ilavesiyle çürütme yapılan reaktörlerde tüm işletimlerde kontrollerine göre daha fazla metan üretildiği, dolayısıyla ikincil besiyerinin metan üretimine olumlu yönde katkısı olduğu görülmüştür.

0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 6 g MA beslenen Faz 3 işletiminin yarısında reaktörlerde sürekli karışım sağlanmış ve karışımın etkisi sadece PÇ çürütmesinde yükselen olarak yaklaşık %17 daha fazla metan üretimi gözlenmiştir.

#### 4.1.3. UKM konsantrasyonu ve giderimi

UKM konsantrasyon değerlerinin zamana bağlı değişimi her işletim şartı için kontrolleri ile paralel olarak Şekil 4.3 a-c'de gösterilmiştir. Kontrol reaktörlerindeki çıkış UKM konsantrasyon değerleri PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 18100±1580, 6080±2250 ve 13695±1830 mg/L'dir. Tüm reaktörlerdeki UKM çıkış konsantrasyon değerlerinin çamur değişimine bağlı değişim gösterdiği ve kararlı halde seyrettiği görülmektedir.

Kontrol reaktörleri ile kıyaslandığında MSA ile beslenen reaktörlerin tüm işletim şartlarındaki UKM konsantrasyon değerleri her üç çamur fraksiyonu için de daha yüksektir. Bunun sebebi, ikincil besiyeri olan ilave organik maddenin yüksek UKM içeriğidir ve anaerobik çürütme sistemlerinde, çürütücü reaktörlere hidroliz hızından yüksek değerlerde organik yük yüklemesi sonucunda sistemde UKM birikimi olur. Bu durumda, çıkış çamurun UKM konsantrasyonu artmaya başlar. Tüm reaktörlerin çıkış UKM değerleri değişen işletim şartları bakımından karşılaştırıldığında, üç çamur

fraksiyonu için de aynı miktarda MSA beslemesi yapılan dönemde UKM konsantrasyonunun artması/azalması benzer şekilde gerçekleşmiştir.

0,59 g UKM-MSA/L.gün OYH'nda 6 (3+3) g MSA beslenen Faz 1'den 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA beslenen Faz 2 işletimine geçtiğinde çıkış UKM konsantrasyon değerinin azaldığı ve azalan konsantrasyonda kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir. Buradaki azalma, Faz 1'deki 3 g MA'nın yerini Faz 2'de daha düşük organik içeriğe sahip olan SA'nın alması ile ilgilidir. 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 6 g MA beslenen Faz 3'te ise UKM konsantrasyonu Faz 1 ve Faz 2'den daha yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. Bunun sebebi MA'nın organik içeriği SA'na göre daha yüksek değerde olmasındandır.

Faz 4 işletiminde MA beslemesi 1,68 g UKM/gün ve 12 g'a artırıldığında da üç çamur fraksiyonu için sistemdeki UKM konsantrasyonu  $2150 \pm 50$  mg/L daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Faz 5'te 1,17 g UKM-MSA/L.gün OYH'nda 12 g MSA (6+6) beslenmiş ve bir önceki işletimde 6 g MA'nın yerini 6 g SA aldığı için, 12 g MSA beslenen Faz 5'te 12 g MA beslenen Faz 4'ten daha düşük çıkış UKM konsantrasyonu gözlemlenmiştir.

Faz 6 işletiminde 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 12 g SA beslenmesi sonucu sistemde toksik etki gerçekleşmesi nedeniyle SA beslemesi durdurulmuş ve üç çamur fraksiyonu için de sadece çamur beslemesi yapılmıştır. Bu durumda sistemdeki UKM konsantrasyon değerlerinde düşüş gerçekleşmiş ve kontrol reaktörlerindeki çıkış UKM değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Reaktörlerdeki düzelme sonrası daha OYH 0,33 g UKM-SA/L.gün olarak daha düşük miktarda (6 g) SA beslenen Faz 2'deki UKM konsantrasyon değerleri aynı miktar besleme yapılan Faz 2'deki değerler ile benzer gerçekleşmiştir. SA'nın çoklu anaerobik çamur çürütmede kısıtlayıcı etkisini değerlendirmek için besleme 8 g'a artırılarak 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda Faz 7 işletilmiş ve SA'nın artan OYH ile birlikte UKM konsantrasyonunun artması yönünde etki göstermiştir.

Faz 1 (6 g MSA), Faz 3 (6 g MA), Faz 4 (12 g MA) ve Faz 5 (12 g MSA) işletim şartlarındaki çıkış UKM konsantrasyon değerlerinin Faz 2 (6 g SA), Faz 6 (12 g SA), Faz 2<sup>1</sup> (6 g SA) ve Faz 7 (8 g SA) işletim şartındaki UKM değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir ve bu durumda söz konusu işletimlerde sistemindeki meyvenin varlığının UKM konsantrasyonu üzerinde arttırıcı etkisi olduğu söylenebilir. İkincil besiyeri ilavesinin anaerobik çamur çürütmede UKM birikimi bakımından MA>MSA>SA şeklinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Çizelge 3.2'de de belirtildiği

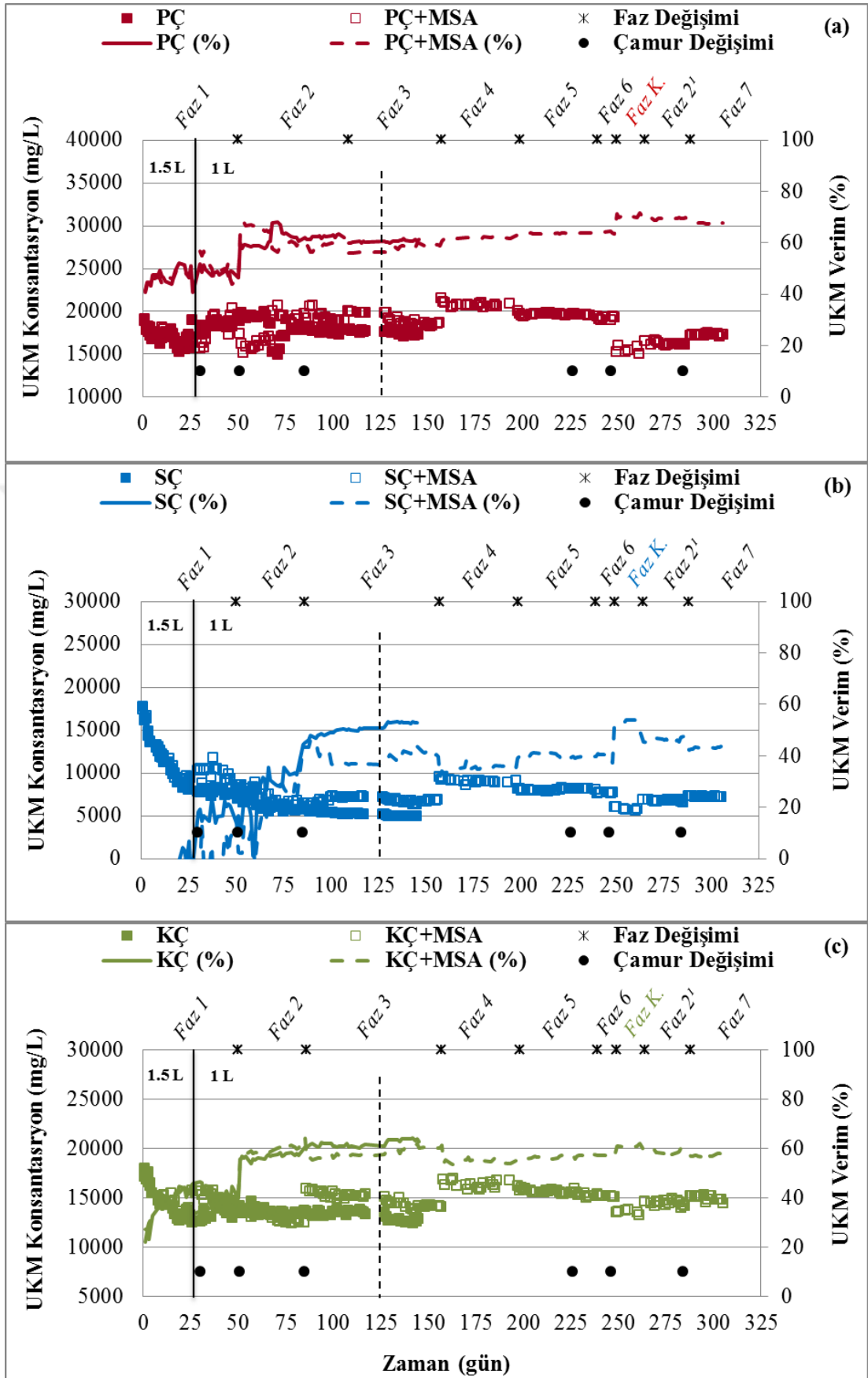
gibi meyve atıkları sebze atıklarına göre daha yüksek UKM değerine sahiptir. Dolayısıyla sistemde bulunan MA, yüksek miktarda organik yük içerdiği için metanojenik bakterilerin aktivitelerini geciktirerek sistemde katı madde birikimine ve UKM konsantrasyonunun artmasına sebep olduğuyla ifade edilebilir.

Sürekli karışıma geçilmesi ile PÇ, SÇ ve KÇ çürütücülerinde hidrolizin arttığı ve UKM seviyesinin düştüğü gözlenmiştir. Kossmann ve Pönitz (2011)'e göre sistemde sürekli karışımın olması, anaerobik çürütme esnasında özellikle hidroliz reaksiyonunu hızlandırarak UKM konsantrasyonu üzerinde azaltıcı etki gösterdiği belirtilmiştir. Dolayısıyla karışım UKM konsantrasyonu azaltarak olumlu yönde etki göstermiştir.

Anaerobik reaktörlere beslenen UKM değerlerinin, sistemdeki hidroliz hızını geçmeyecek değerlerde olması gerekir. Çünkü UKM beslemesi sistemin hidroliz hızından yüksek olursa sistemde UKM birikimine sebep olur. Sistemde UKM birikimi arttıkça UKM giderim verimi azalır ve çıkış çamurunun kalitesi düşebilir. Bu nedenle bu çalışmada MSA ilavesinin artan OYH'ları ile reaktörlerdeki UKM giderim verimi çıkış UKM konsantrasyonu değişimine göre izlenmiştir.

Kontrol reaktörlerinin UKM giderim verimleri PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla %61±2, %50±3 ve %58±5 şeklindedir. PÇ reaktöründe UKM giderim verimi genel olarak SÇ ve KÇ'ye göre yüksek olması beklenir çünkü PÇ'nin kolay parçalanabilir organik madde içeriği SÇ ve KÇ'den fazladır (Le ve ark., 2015). Çalışmada PÇ, SÇ ve KÇ kontrol reaktörleri, UKM giderim verimi açısından PÇ>KÇ >SÇ şeklinde sıralama ile beklenen sonuç elde edilmiştir.

PÇ+MSA reaktörüne farklı OYH ve içerikte MSA beslenerek çoklu anaerobik çamur çürütme sonucu elde edilen UKM giderim verimleri Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 6, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7'de sırasıyla %52±4 (6 g MSA), %63±3 (6 g SA), %57±2 (6 g MA), %61 (12 g MA), %63 (12 g MSA), %64 (12 g SA), %70 (6 g SA) ve %68 (8 g SA) değerlerinde gerçekleşmiştir. Farklı OYH'larında gerçekleşen işletimlerde UKM konsantrasyon değerinin artması UKM giderim veriminin azalmasıyla, UKM konsantrasyonun azalması ise UKM giderim veriminin artmasıyla sonuçlanmıştır. PÇ+MSA reaktörlerindeki UKM verimleri kontrol PÇ reaktörü ile kıyaslandığında Faz 1, Faz 3 ve Faz 4 işletimlerinde eşit değerlerde elde edilmiştir. Bu işletimlerde MA ile beslemeden kaynaklı UKM birikimi, UKM giderim verimi üzerinde ilave artış göstermemiştir. Faz 2, Faz 5, Faz 6, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7 işletimlerinden elde edilen UKM giderim verimleri ise kontrol reaktörüne kıyasla sırasıyla %2-6 (6 g SA), %2 (12 g MSA), %3 (12 g SA), %9 (6 g SA) ve %7 (8 g SA) daha fazla değerlerde gerçekleşerek



Şekil 4.3. PÇ (a), SÇ (b) ve KÇ (c) reaktörlerinin çıkış UKM konsantrasyon değerlerine karşılık %UKM giderim verimlerinin değişimi

artış yönünde etki etmiştir. Dolayısıyla SA beslemesinin yapıldığı işletimlerde UKM konsantrasyonu daha düşük olduğundan UKM giderimi MA beslemesinin yapıldığı işletimlere göre daha iyi verim göstermiştir. PÇ+MSA reaktörlerinin tüm faz işletimleri birbiri ile kıyaslandığında kontrol reaktörüne göre en yüksek verim %70 UKM giderimiyle 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA beslenen Faz 2<sup>1</sup>'de gerçekleşmiştir (Şekil 4.3 a).

SÇ+MSA reaktörlerinden elde edilen UKM giderim verimleri Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 6, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7 için sırasıyla %8 (6 g MSA), %25 (6 g SA), %42 (6 g MA), %34 (12 g MA), %39 (12 g MSA), %41 (12 g SA), %46 (6 g SA) ve %43 (8 g SA) değerlerinde gerçekleşmiştir. 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 6 g MA beslenen Faz 3'teki UKM giderim verimi 1,68 g UKM/gün OYH'nda 12 g MA beslenen Faz 4'teki giderimden daha yüksek verimle gerçekleşmiştir. Burada MA'nın artan OYH'nın sistemde hidroliz hızını yavaşlatarak UKM konsantrasyonunu artırması Faz 4'teki UKM giderim veriminin azalmasıyla sonuçlanmıştır. Aynı şekilde 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA beslemesinin yapıldığı Faz 2<sup>1</sup> işletiminden elde edilen UKM verimi 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 8 g SA beslenen Faz 7 işletimiyle kıyaslandığında, 2 g daha az besleme yapılan Faz 2<sup>1</sup>'den Faz 7'ye göre %3 daha yüksek UKM giderimi elde edilmiştir. Bunun sebebi de, Faz 2<sup>1</sup>'deki UKM konsantrasyonunun azalması ile UKM giderim veriminin artması olarak açıklanabilir. Tüm faz işletimleri arasından en iyi UKM verimi %46 giderim ile 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA beslemesinin yapıldığı Faz 2<sup>1</sup>'de gerçekleşmiştir. Ancak kontrol SÇ reaktörü ile kıyaslandığında tüm işletimlerin UKM verimi daha düşük değerlerde gözlenmiştir. Bu durum, SÇ'un düşük organik içeriğe sahip karakterde olması ve hidroliz hızından daha yüksek seviyede beslenen MSA'nın yavaş ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.3 b).

KÇ+MSA reaktörüne farklı OYH ve içerikte MSA beslenerek çoklu anaerobik çamur çürütme sonucu elde edilen UKM verimleri Faz 1, Faz 2, Faz 3, Faz 4, Faz 5, Faz 6, Faz 2<sup>1</sup> ve Faz 7'de sırasıyla %38 (6 g MSA), %60±3 (6 g SA), %58±2 (6 g MA), %54 (12 g MA), %56±2 (12 g MSA), %57 (12 g SA), %59 (6 g SA) ve %57 (8 g SA) olarak yakın seviyelerde elde edilmiştir. Farklı OYH'nda işletilen reaktörlerin UKM giderim veriminin azalması sistemdeki UKM konsantrasyon değerinin artması, UKM giderim veriminin artması ise sistemdeki UKM konsantrasyonunun azalması ile sonuçlanan hidroliz hızı yeterliliği veya kısıtlamasından kaynaklanmıştır. KÇ+MSA reaktörlerinin tüm faz işletimleri birbiri ile kıyaslandığında en yüksek verim %60±3



UKM giderimiyle OYH 0,33 g UKM-SA/L.gün olarak 6 g SA beslenen Faz 2’de gerçekleşmiştir. Kontrol KÇ reaktörü ile kıyaslandığında ise KÇ+MSA reaktörlerinde daha yüksek UKM konsantrasyon elde edilmesinden dolayı daha düşük değerlerde gözlenmiş ve neredeyse eşit değerlerde UKM verimi elde edilmiştir (Şekil 4.3 c).

Genel olarak %UKM değerlerinin üç çamur fraksiyonu için de 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH’ndaki 6 g SA ile beslenen reaktörlerde daha yüksek değerde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, SA’nın çoklu anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliği artırması şeklinde ifade edilebilir.

Aritma çamurlarının UKM giderim verimlerini ayrık sistem olarak değerlendirdiğimizde, MSA ilavesiyle PÇ için belirli işletme şartlarında UKM verimini artırıcı yönde etki gösterirken SÇ ve KÇ için sistemde UKM birikimine yol açarak verim üzerinde olumlu bir etki göstermediği, dolayısıyla PÇ’un çoklu anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliğinin daha iyi olduğu sonucuna varılabilir.

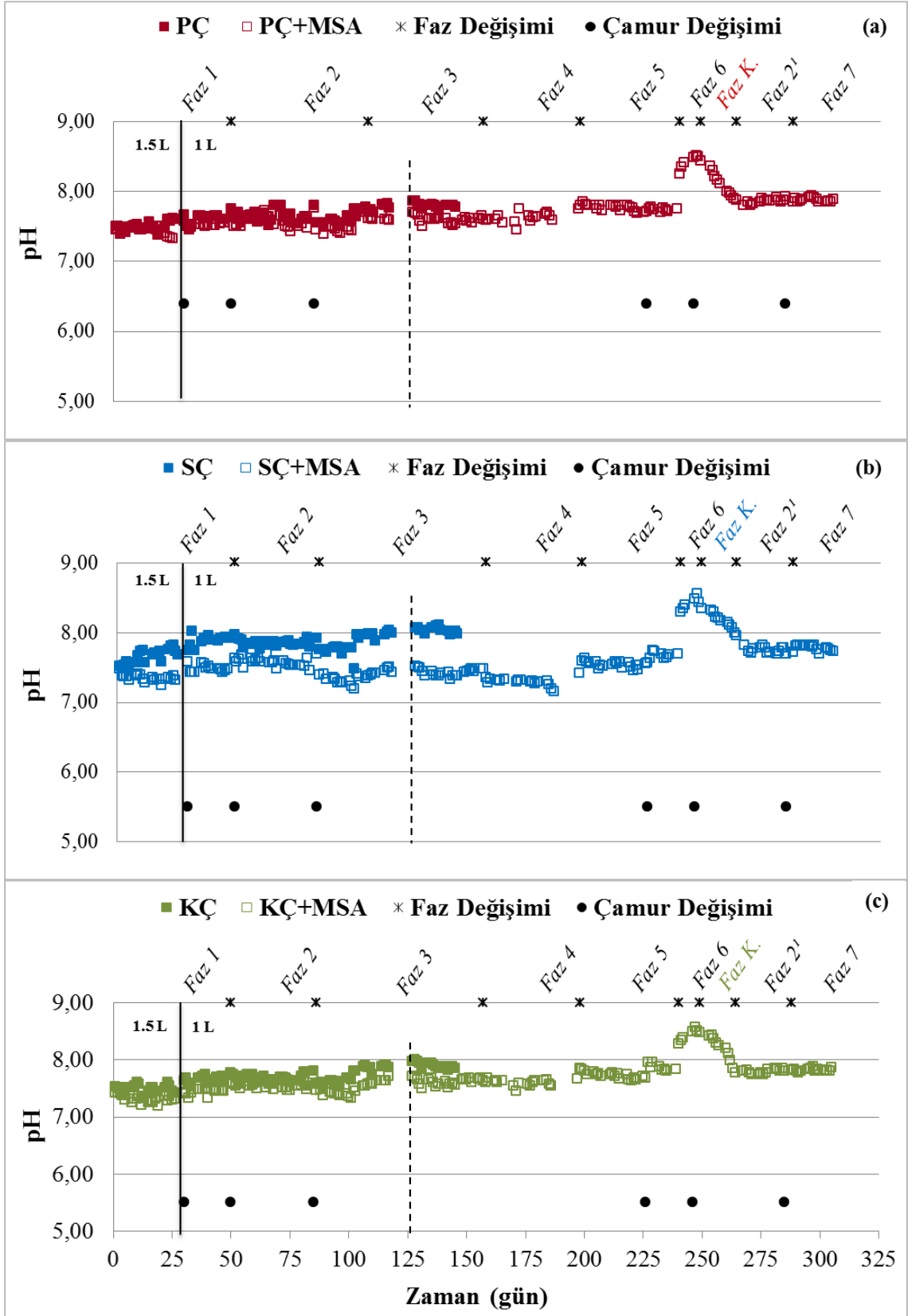
Ayrıca reaktörlerin sürekli karışimli sisteme geçmesiyle %UKM veriminin PÇ, SÇ ve KÇ’da arttığı ve karıştırıcının hidroliz reaksiyonlarını hızlandırarak %UKM verimi üzerinde olumlu etki sağladığı tespit edilmiştir.

#### **4.1.4. pH değişimi**

Reaktörlerdeki pH değişimleri üç çamur fraksiyonu için kontrol reaktörlerine paralel olarak Şekil 4.4 a-c’de gösterilmektedir. Kontrol reaktörlerinde pH’nın değerleri PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 7,73, 7,87 ve 7,74 olarak gerçekleşmiştir. Anaerobik çürütme sistemlerinde metan bakterileri için optimum pH aralığı 7,2-8,2 olarak bilinmektedir (Öztürk, 2007). Bu durumda elde edilen pH değerleri sistemin stabil ve uygun olduğunu göstermektedir.

MSA ilave edilen reaktörlerdeki pH değerleri farklı işletme şartına üç çamur fraksiyonu için de göre iniş-çıkış gösterse de kontrollerine göre daha düşük pH seviyelerinde değişim göstermiştir ve optimum aralıktadır. Sebze ve meyve atıklarının içerisinde bulunan yüksek basit şekerler asitleşmeyi teşvik ederler ve bu asitleşmeye bağlı olarak reaktör içinde pH düşüşü görülür (Scano ve ark., 2014). Dolayısıyla reaktörlerdeki bu pH düşüşü beklenen bir durumdur.

Faz değişimine bağlı olarak pH aralığının üç çamur fraksiyonunda da iniş çıkış göstermesi, ilgili fazın MSA’nın içeriğine bağlıdır. PÇ, SÇ ve KÇ için en düşük pH



Şekil 4.4. PÇ (a), SÇ (b) ve KÇ (c) reaktörlerinin farklı MSA ve OYH'larına bağlı pH değişimleri

değerleri Faz 4 işletiminden elde edilmiştir ve bu durum Faz 4'ün OYH 1,68 g UKM MA/L.gün olarak (12 g) beslenmesi ile ilgilidir. Bu işletmede beslenen MA'nın içeriği düşük pH'ya sahip olmasına rağmen proses stabilitesi ve metan bakterilerinin aktivitesi nedeniyle pH 7,70 olarak değerine yükselmiştir. Bouallagui ve ark. (2009), arıtma çamurlarının meyve ve sebze atıkları ile çoklu anaerobik çürütülmesiyle sistem performansını incelediği çalışmasında, çürütme sonrası sistemin pH değerinin 6,9-7,57 arasında nötr değerlerde gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu çalışmadan elde edilen değer ile yakınlık göstermektedir.

1,17 g UKM-MSA/L.gün OYH'ndaki 12 g MSA beslenen Faz 5 işletimde pH 7,50-7,80 değer aralığında iken Faz 6'da 8,15-8,60 seviyelerine yükselmiştir. 12 g SA beslenen Faz 6 işletiminin başlamasıyla sistemde meydana gelen toksik etki üç çamur fraksiyonu için de UYA değerleriyle birlikte pH'nın da artmasıyla sonuçlanmıştır. Ham çamur ve OYH 0,33 g UKM-SA/L.gün ile tekrar azalmış ve 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 8 g SA'nın beslendiği Faz 7'de pH değeri 7,40-7,56 seviyelerine düzelmeye göstermiştir.

MSA ilavesinin sistemde pH değişimine etkisi ayrı sistem olarak değerlendirildiğinde, SÇ'un faz değişimlerinde PÇ ve KÇ'a göre daha az etkilendiği ve daha stabil bir halde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca çoklu anaerobik çürütme yapılan reaktörlerin sürekli karışıma geçmesi, sistemdeki pH değişimi üzerinde etki göstermemiştir.

#### **4.1.5. UYA ve $\text{HCO}_3^-$ ilişkisi**

Çalışma boyunca kontrol reaktörlerinde üç çamur fraksiyonu için de UYA oluşumu gözlenmemiştir.

MSA beslenerek çoklu anaerobik çamur çürütme yapılan reaktörlerdeki UYA ve  $\text{HCO}_3^-$  değişimleri üç çamur fraksiyonu için de Şekil 4.5 a-c'de gösterilmektedir.

MSA ilavesinin reaktörlerdeki pH değeri üzerinde asidik etkisi olduğu fakat izlenen UYA değerlerinin Faz 5'e kadar sıfır seviyesinde olması oluşan asitlenmenin bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) alkalinitesi ile karşılandığını göstermiştir (Şekil 4.5 a-c). 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 12 g SA beslenen Faz 6 işletiminde reaktörlerde oluşan toksik etki, üç çamur fraksiyonu için de UYA'nın yükselmesiyle sonuçlanmıştır.

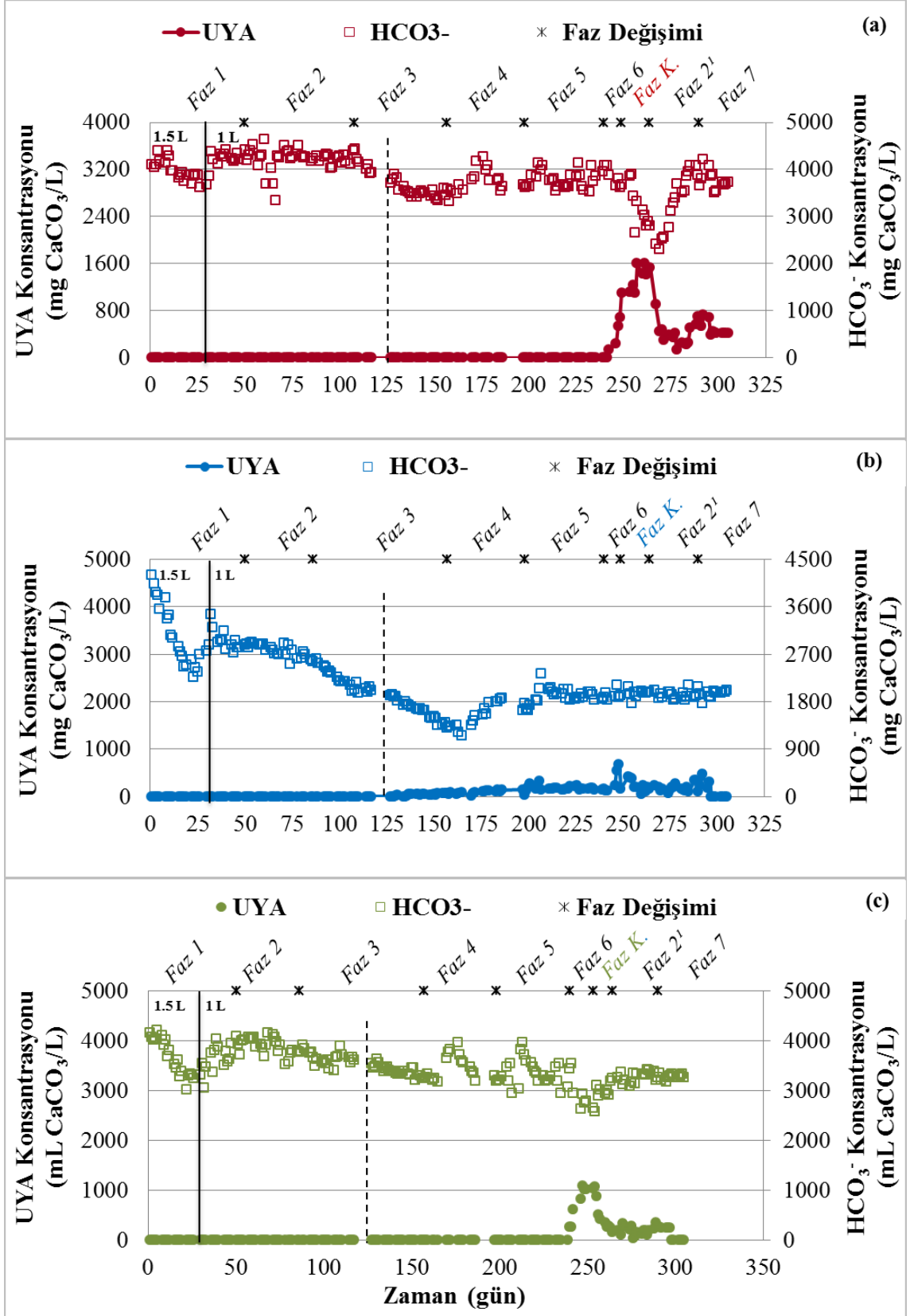
PÇ+MSA reaktörü için  $\text{HCO}_3^-$  değeri 6 g MSA, SA ve MA beslenen ilk üç fazda kademeli olarak azalma yönünde ilerlemiş, OYH 1,68 g UKM-MA/L.gün 12 g MA ve 1,17 g UKM-MSA/L.gün 12 g MSA beslenen Faz 4 ve Faz 5 işletimlerinde artış

göstermiştir. 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 12 g SA beslenen Faz 6'da UYA'nın artması,  $\text{HCO}_3^-$  değerlerinin de azalması ile sonuçlanmıştır. Anaerobik sistemlerde  $\text{HCO}_3^-$  konsantrasyonunu arttıran reaksiyon proteinin hidrolizidir, dolayısıyla meyvenin ağırlıkta olduğu Faz 4 ve Faz 5'te parçalanabilme hızının artması şeklinde, Faz 6 işletiminde ise bu reaksiyonda metan üretme hızının üstüne çıkılarak yavaşlama gerçekleştiği şeklinde kabul edilebilir. 6 g ve 8 g SA beslenen Faz 2' ve Faz 7 döneminde ise sistemde UYA konsantrasyon değerinde azalma olduğu görülmektedir ancak metan bakterileri üzerinde toksisite etkisinin kaldığı söylenebilir (Şekil 4.5 a). SÇ+MSA ve KÇ+MSA reaktörleri için de aynı miktarlarda MSA, SA ve MA beslenen aynı işletim dönemlerinde PÇ+MSA reaktöründe oluşan benzer durumlar gözlenmiştir (Şekil 4.5 b-c).

Aritma çamurları ayrık sistem olarak düşünüldüğünde, 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH'ndaki 12 g SA'nın UYA'yı artırıcı yönde etkisi en çok PÇ'da gerçekleşmiştir. Bu durum PÇ'daki metan bakterilerinin toksik etki karşısında SÇ ve KÇ'a göre daha hassas olması ile açıklanabilir.

Reaktörlerin sürekli karışımli sisteme geçmesiyle  $\text{HCO}_3^-$  konsantrasyonunda üç çamur için de belirgin bir azalma gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak meyve atıkları, yüksek organik içeriğe sahip ve biyolojik olarak kolayca parçalanabilen organik maddelerdir (Angelidaki ve ark., 2003). Bu durumda biyolojik olarak kolay ayrışabildikleri için meyve atıklarının metan üreten arkeler için UYA birikimine yol açmadan hassas asitlenme-metanlaşma dengesinde çürütülmesi önemlidir.



Şekil 4.5. PÇ+MSA (a), SÇ+MSA (b) ve KÇ+MSA (c) reaktörlerinin UYA ve HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ilişkisi

#### 4.1.6. İletkenlik ve TKM değişimi

Reaktörlerdeki iletkenlik değişimleri PÇ, SÇ ve KÇ için kontrolleri ile birlikte Şekil 4.6 a-c'de gösterilmiştir. Hidroliz basamağına etkinin belirlenmesi bakımından TKM artışına karşılık iletkenlik parametresindeki değişim izlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Kontrol reaktörlerinde iletkenlik aralıkları PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 6.8-8.2, 4.9-6.0 ve 6.1-7.1 mS/cm olurken SÇ için en düşük ve KÇ için ara seviyede gerçekleşmiştir. 1 L aktif çalışma hacminde tekrar kurulan PÇ'un iletkenlik değerinin azalması reaktördeki hidroliz hızının azaldığını göstermektedir. Buna karşılık SÇ ve KÇ'da iletkenlik değerlerinin dengede olması reaktörlerdeki hidroliz ve diğer bakteri faaliyetlerinin sabit hızda kararlı halde gerçekleştiğini göstermiştir. Kontrol reaktörlerindeki iletkenlik değerlerine karşılık çıkış TKM konsantrasyon değerlerinin azalarak kararlı hale geldiği görülmektedir.

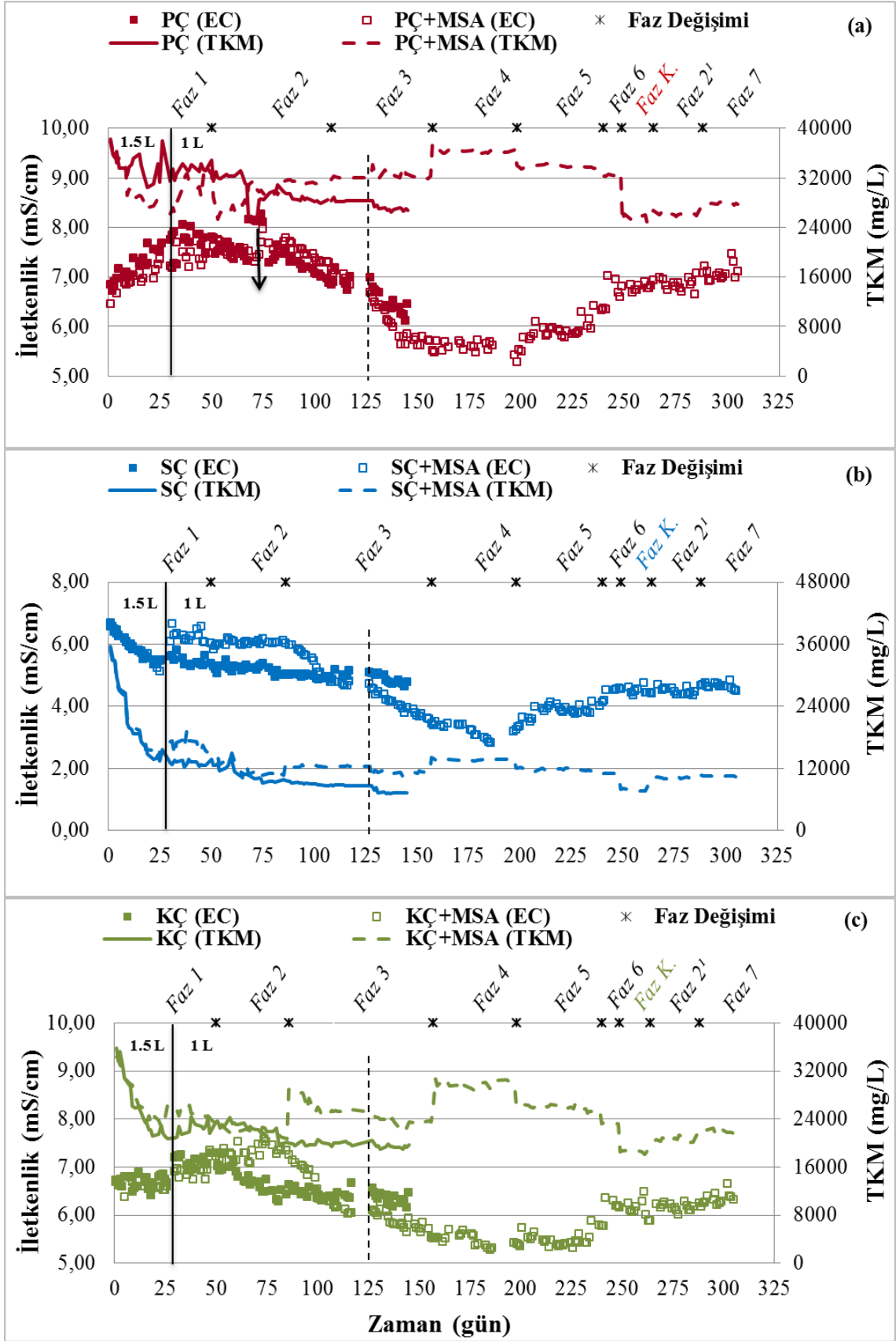
MSA ilave edilen reaktörlerdeki çıkış iletkenlik ve TKM konsantrasyon değerleri üç çamur fraksiyonu için de kontrollerine göre daha yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. Burada arıtma çamurlarının yanında çoklu besiyer olarak kullanılan MSA'lar, reaktörlerdeki TKM konsantrasyonunu artırmış ve hidroliz hızının artmasına bağlı olarak iletkenlik değerlerinde değişkenlik göstermiştir.

MSA ilavesi ile reaktörlerde meydana gelen iletkenlik ve TKM değişimleri farklı faz bakımından birbiri ile karşılaştırıldığında, PÇ, SÇ ve KÇ için de aynı OYH'na sahip işletim sürecinde benzer durumların oluştuğu görülmektedir. MSA miktarına göre değişen TKM konsantrasyonuna karşılık çıkış iletkenlik değerleri Faz 4'ün sonuna kadar düşüş sonrasında ise artış yönünde gerçekleşmiştir. En fazla düşüşün gerçekleştiği OYH 0,84 g UKM-MA/L.gün olan Faz 3 ve 1,68 g UKM-MA/L.gün olan Faz 4 işletimi, söz konusu fazlarda sadece MA içeriğinin olduğu ile ilgilidir. Burada beklenenin aksine TKM konsantrasyonu artarken iletkenlik değerlerinde düşük gerçekleşmiştir ve bunun sebebi artan biyokütlenin bakteri yani çamur yapısına geçmesidir. Faz 5 işletiminde 1,17 g UKM-MSA/L.gün OYH'nda iletkenlik değerinin yükselmesi ise sistemde SA'nın olduğu ile ilgilidir. Burada, çürütücülere beslenen çoklu besiyerinin iletkenlik değeri üzerinde MA'nın azaltıcı, SA ilavesinin ise artırıcı yönde etki gösterdiği, bu artışın da ilave organik madde hidrolizi ile açığa çıkan inorganik maddeden kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca reaktörlerdeki çıkış TKM konsantrasyonu, farklı OYH'larında beslenen MSA'nın içerik ve miktarına göre değişim göstererek ilgili faz içinde sabit ve kararlı kalmıştır. Buna karşılık iletkenlik

değerleri, beslenen MSA'nın TKM'sine göre her işletim şartı için başlangıçta değişim gösterse de işletim sürecinde azalma göstermiştir. Bu durum çoklu besiyeri ile anaerobik çürütmede sistemdeki bakteri büyümesinin artarak çözülmüş maddelerin bakteri formuna geçmesi ile açıklanabilir. Bu çalışmada en fazla TKM konsantrasyonuna karşılık en düşük iletkenlik değeri 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda Faz 4 işletiminden elde edilmiştir. Bunun sebebi MA'nın organik madde içeriğinin SA'na göre daha fazla oluşu ve dolayısıyla hidroliz hızını yavaşlattığı ile ilgilidir. Ayrıca MA'da daha fazla mineralizasyon vardır.

MSA ilavesinin üç çamur fraksiyonu arasından özellikle SÇ çürütmesinde bakteri üzerinde olumlu etkisi olduğu sonucu elde edilmiştir.

Reaktörlerin 0,84 g UKM-MA/L.gün OYH'ndaki Faz 3 döneminde ve özellikle sürekli karışımın uygulanması ile iletkenlik değerlerinde belirgin bir düşüş elde edilmiştir. Bu durum artan bakteriyel büyüme ile çözülmüş maddelerin bakteri yani çamur yapısına geçmesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.6. PÇ (a), SÇ (b) ve KÇ (c) reaktörlerinin iletkenlik ve TKM değişimi

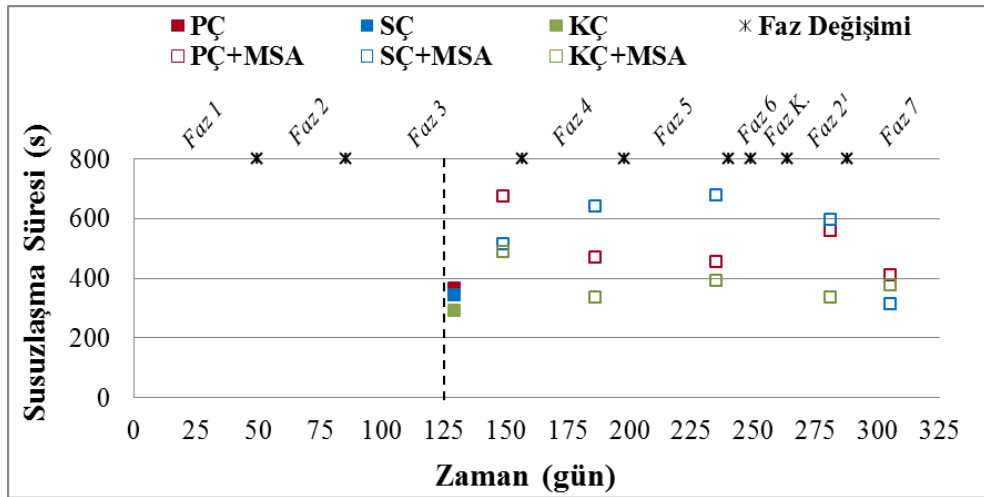


#### 4.1.7. Susuzlaşma kabiliyeti

Reaktörlerdeki stabilize çamur üzerinde yapılan susuzlaşma süreleri PÇ, SÇ ve KÇ için kontrol ve farklı OYH'larına sahip Faz değişimlerine bağlı olarak Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Kontrol reaktörlerinin stabilize çamurdaki susuzlaşma süreleri PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 366, 344 ve 291 saniye (s) olarak gerçekleşmiştir. Anaerobik reaktörlerdeki susuzlaşma süreleri çamurun içerisindeki bileşenlere göre üç çamur fraksiyonu için değişiklik göstermekle birlikte çürütücünün TKM-UKM gibi proses parametreleriyle orantılıdır.

MSA ilavesiyle birlikte anaerobik reaktörlerin katı madde konsantrasyonunun değişmesinden dolayı susuzlaşma süreleri hem kontrollerine hem de farklı OYH'na sahip fazlar birbirine göre değişim göstermiştir. Özellikle SÇ için farklı fazlarda reaktörde katı birikmesiyle artan susuzlaşma gözlenmiştir. Bu durum SÇ'nin yapısındaki mikrobiyal topluluklarının rolü ve flok ağırlıklı olması ile ilgilidir. Ancak OYH 0,44 g UKM-SA/L.gün olan Faz 7'de HBS diğer fazlara göre daha az olduğundan susuzlaşma süresi azalmıştır.

PÇ ve SÇ için en iyi susuzlaşma süresi 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'nda Faz 7 işletiminden sırasıyla 412 ve 312 s, KÇ içinse Faz 2<sup>1</sup> işletiminden 335 s olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Stabilize PÇ, SÇ ve KÇ'nin kontrol ve faz değişimlerine göre elde edilen susuzlaşma süreleri

#### 4.1.8. TN ve TP içeriği

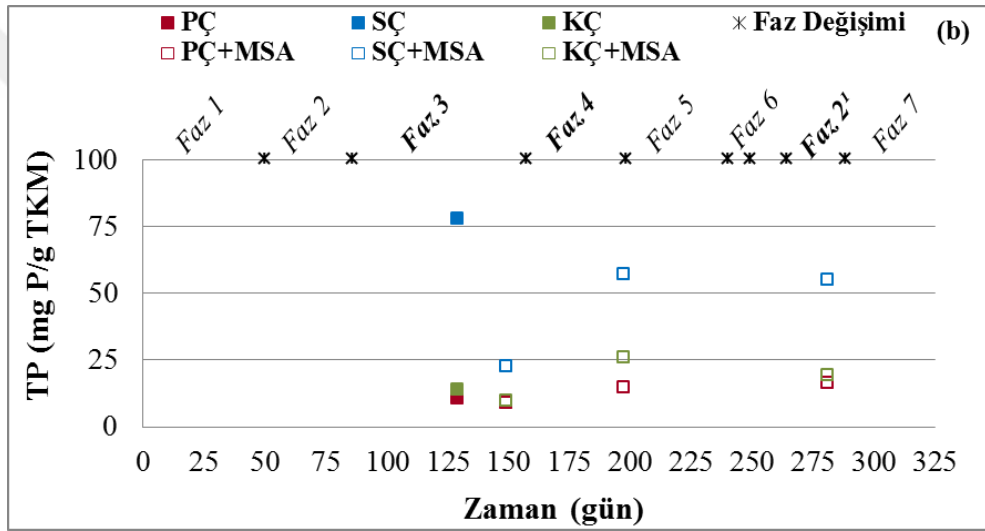
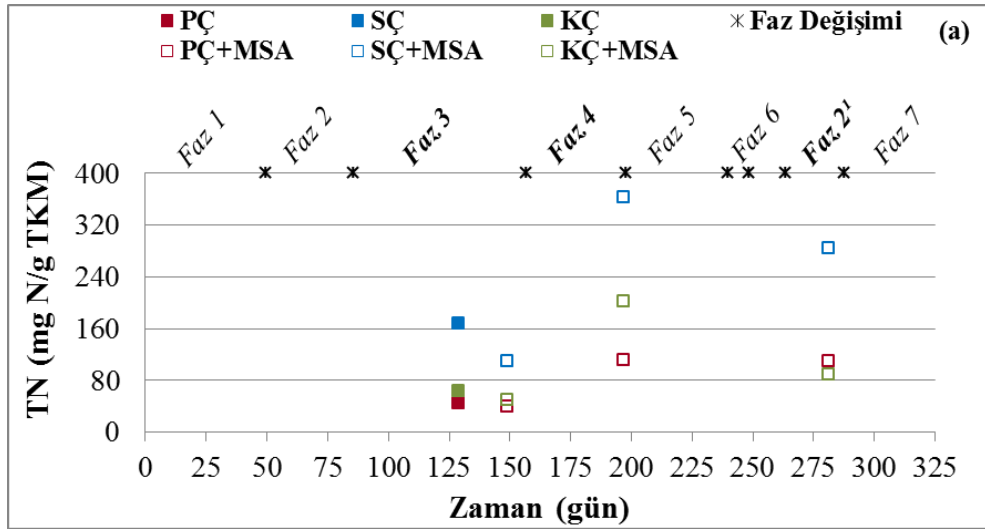
Stabilize çamurlardaki N içeriği kontrol ve 3 farklı OYH'nda (0,84 g UKM-MA/L.gün, 1,68 g UKM-MA/L.gün ve 0,33 g UKM-SA/L.gün) işletilen reaktörlerde ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.8 a-b'de gösterilmektedir.

Kontrol PÇ, SÇ ve KÇ için N değerleri sırasıyla 42.6-48.3, 158-178 ve 61.2-67.7 mg N/g TKM aralığında ve P değerleri sırasıyla 10.6, 78.1 ve 14.1 mg P/g TKM olarak elde edilmiştir.

0,84 g UKM MA/gün OYH'na sahip Faz 3 işletimi sonrası stabilize çamurda PÇ, SÇ ve KÇ için TN değerleri sırasıyla 37-42, 105-114 ve 49-52 mg N/g TKM olarak ve P değerleri sırasıyla 9, 23 ve 10 mg P/g TKM aralığında elde edilmiştir. Çoklu besiyer ilavesi ile anaerobik çürütme yapılan reaktörlerin TN değerlerinin kontrol reaktörlerine göre daha az oluşu sebze ve meyve atıklarının (özellikle yeşil sebzeler) düşük selüloz içeriğine sahip oluşu ile ilgilidir. Rizk ve ark. (2007)'a göre arıtma çamurlarındaki TN değerleri 37,3-78,1 mg TN/g TKM olarak değişmektedir. Çalışmada PÇ ve KÇ'den elde edilen TN değerleri literatür ile benzer seviyelerdedir. Ayrıca çoklu besiyeri ile işletilen reaktörlerindeki TN ve TP değerlerinin yakın değerlerde olması MSA'nın ilavesinin düşük besleme miktarından kaynaklandığı söylenebilir.

1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'na sahip Faz 4 işletimi sonrası stabilize çamurda PÇ, SÇ ve KÇ için TN değerleri sırasıyla 111, 363 ve 202 mg N/g TKM olarak ve P değerleri sırasıyla 15, 57 ve 26 mg P/g TKM aralığında elde edilmiştir. OYH'nın 2 kat artışı reaktörlerdeki nütrient içeriğinde artış göstermiştir.

0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'na sahip Faz 2<sup>1</sup> işletiminde stabilize çamurda PÇ, SÇ ve KÇ için TN değerleri sırasıyla 110, 285 ve 90 mg N/g TKM olarak ve P değerleri sırasıyla 17, 55 ve 19 mg P/g TKM aralığında elde edilmiştir. Nütrient içeriği Faz 4'ten az Faz 3'ten ise yüksek gerçekleşmiştir.



Şekil 4.8. Stabilize PÇ, SÇ ve KÇ'nin kontrol ve farklı OYH'larına göre elde edilen TN (a) ve TP (b) değerleri

## 4.2. Sonuçların Değerlendirmesi

Çalışma kapsamında MSA'nın öğütüldükten sonra PÇ, SÇ ve KÇ yanında çoklu besiyeri olarak yarı-sürekli anaerobik çürütücülere beslenmesi sonucu elde edilen optimum sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çalışma süresince çoklu besiyeri anaerobik çürütme yapılan reaktörlerin günlük metan üretim değerleri kontrol reaktörlerine göre üç çamur fraksiyonu için de artış göstermiştir. Günlük metan üretiminin çoklu besiyeri ile tüm fazlarda artmasına karşılık spesifik metan üretim değerleri sistemdeki katı madde birikimine bağlı olarak farklı OYH'larında farklı değerlerde gerçekleşmiştir. Reaktörlerin sürekli karışım olarak işletilmesi genel olarak pH, günlük metan üretimi ve SMÜ değerleri değişiminde çok etki etmemiş ancak iletkenlik ve UKM konsantrasyon değerleri üzerinde düşüş gözlemlenmiştir.

PÇ'den elde edilen optimum sonuçlar Çizelge 4.2'den incelendiğinde, en iyi SMÜ  $730 \pm 50$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> olarak 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'ndan 6 g sebze beslemesi ile elde edilmiştir. Burada UKM giderim verimindeki artış %9 olarak ve susuzlaşma özelliği 412 s ile en iyi bu OYH'nda gerçekleşmiştir. Günlük metan üretimi en yüksek MA ve en düşük SA ilavesinden elde edilmiş olup MSA beslemesi için ara değerde gerçekleşmiştir. MA'ndan en yüksek metan üretimi ise 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda  $2100 \pm 90$  mL/gün değerinde elde edilmiştir. Burada günlük metan üretiminin artması ancak SMÜ'nin azalması, ilave organik madde ile sistemde UKM birikimi gerçekleştiğini, OYH'nın anaerobik çürütmenin hidroliz evresinde mikroorganizmaların hızını aştığını göstermektedir. En iyi iletkenlik değeri de 5,45 mS/cm ile bu OYH'ndan (1,68 g UKM-MA/L.gün) elde edilmiştir.

SÇ'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde, maksimum SMÜ  $775 \pm 55$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> olarak 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'ndan 8 g sebze beslemesi ile elde edilmiştir. En iyi metan verimiyle birlikte en iyi susuzlaşma kabiliyeti de 376 s olarak bu OYH'nda gerçekleşmiştir. Buna karşılık UKM giderim veriminde artış gerçekleşmemiştir. SÇ'un yapısının düşük organik içeriğe sahip olması ve yüksek organik içerikte besleme yapılması sonucu hidroliz hızının aşılarak yavaş ayrışmasından dolayı ilave organik maddenin UKM giderim verimine katkısı olmamıştır. En yüksek metan üretimi MA'nın 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda  $1195 \pm 80$  mL/gün değerinde elde edilmiştir. 3,28 mS/cm iletkenlik değeri ile en iyi sonuç da bu OYH'nda (1,68 g UKM-MA/L.gün) gerçekleşmiştir.

KÇ'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en yüksek metan üretimi verimi 830±80 olarak 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 6 g SA ilavesinde gerçekleşmiştir. En iyi susuzlaşma özelliği 312 s olarak ve %UKM giderimindeki artış %3 oranında bu OYH'ndan (0,33 g UKM-SA/L.gün) elde edilmiştir. Maksimum metan üretiminin PÇ ve SÇ'da olduğu gibi 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 12 g MA ilavesiyle 1855±40 mL/gün değerinde elde edildiği görülmektedir. En iyi iletkenlik değeri 5.47 mS/cm ile maksimum metan üretiminin gerçekleştiği bu OYH'nda (1,68 g UKM-MA/L.gün) gerçekleşmiştir. Farklı OYH ve içerikteki MSA ilavesinde metan üretimindeki artışa rağmen SMÜ değerlerinde fazla bir artış gözlemlenmemiştir. Bu durumda KÇ'ye çoklu besiyeri ilavesinin biyolojik bozunabilirliğine katkı sağlamadığı söylenebilir.

Üç çamur fraksiyonunda da farklı MSA, MA ve SA içeriğinin artan OYH'nda beslenmesiyle günlük metan üretiminin artmasına rağmen SMÜ değerlerinin sabit kalması ya da azalması, sistemde UKM birikmesine sebep olarak hem SMÜ hem de %UKM üzerinde etki göstermediği şeklinde açıklanabilir.

Genel olarak bakıldığında ilave organik maddenin farklı içerik ve OYH'ndan elde edilen metan üretimi MA>MSA>SA olarak azalan değerlerde değişiklik göstermiş ve MA'nın 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda 12 g olarak beslenmesiyle üç çamur fraksiyonu için de maksimum sonuçları vermiştir. Özellikle SÇ üzerindeki değişim ve anaerobik çürütme performansına katkısı PÇ ve KÇ'ye göre daha fazladır. Bu durumda SÇ'nin çoklu besiyeri anaerobik çürütme performansı daha kararlı ve stabilitesi en etkili şekilde gerçekleştiği dikkate değerdir.

İletkenlik tuzluluğun bir ölçüsüdür ve yüksek olması durumunda toprakta mikrobiyal aktiviteyi etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle fazla tuzlu çamurun toprağa ilavesiyle topraktaki nütrientlerin döngüsü azaltarak fitotoksositeye neden olduğu bilinmektedir. Wong ve ark. (2001), arıtma çamurunun elektriksel iletkenliği (EC)<2 mS/cm ise tuzluluk etkisinin ihmal edilebileceğini fakat bu oran 2-4 mS/cm ise çok hassas ürünler için tuzluluğun sınırlandırılabilceğini ileri sürmüşlerdir. MSA ilavesiyle iletkenlik değerleri PÇ ve KÇ için tüm işletimlerde genel olarak 4-7.1 mS/cm aralığında gözlenmiştir. Mikrobiyal aktiviteyi etkileyen önemli bir faktör olduğundan bu bilgiler doğrultusunda stabilize PÇ ve KÇ'un toprakta kullanımı uygun değildir. SÇ'nin OYH 1,68 g UKM-MA/L.gün ve 1,17 g UKM-MSA/L.gün olarak beslendiği işletimlerde iletkenlik değerleri 2-4 mS/cm aralığında gerçekleşmiştir ve SÇ'un bu OYH'ndaki MA ve MSA ilavesiyle çürütülmesi durumunda hassas ürünlerde sınırlandırılması koşuluyla toprakta kullanılması sağlanmıştır.

Çizelge 4.2. Çalışmadan elde edilen sonuçların özet tablosu

<i>MEYVE</i>						
SMÜ (mL/gUKM <sub>bes</sub> -gün)	SMÜ Artış (mL/gUKM <sub>MA</sub> )	Metan Üretimi (mL/gün)	UKM Verim Artış (%)	EC (mS/cm)	Susuzlaşma Süresi (s)	
0,84*	0,84*	0,84*	0,84*	0,84*	0,84*	1,68*
1,68*	1,68*	1,68*	1,68*	1,68*	1,68*	1,68*
630±30	702	1640±150	2100±90	6,30	5,45	471
630±70	679	770±100	1195±80	4,72	3,28	642
790±90	810	1440±195	1855±40	6,35	5,47	336

<i>SEBZE</i>						
SMÜ (mL/gUKM <sub>bes</sub> -gün)	SMÜ Artış (mL/gUKM <sub>SA</sub> )	Metan Üretimi (mL/gün)	UKM Verim Artış (%)	EC (mS/cm)	Susuzlaşma Süresi (s)	
0,33*	0,33*	0,33*	0,33*	0,33*	0,33*	0,44*
0,44*	0,44*	0,44*	0,44*	0,44*	0,44*	0,44*
730±50	1061	1400±130	1210±80	7,37	7,10	561
760±70	848	490±90	650±40	5,93	4,58	597
830±80	758	1010±200	1150±50	7,15	6,30	335

<i>MEYVE+SEBZE</i>						
SMÜ (mL/gUKM <sub>bes</sub> -gün)	SMÜ Artış (mL/gUKM <sub>MSA</sub> )	Metan Üretimi (mL/gün)	UKM Verim Artış (%)	EC (mS/cm)	Susuzlaşma Süresi (s)	
0,585*	1,17*	0,585*	1,17*	0,585*	1,17*	0,585*
1,17*	1,17*	1,17*	1,17*	1,17*	1,17*	1,17*
650±50	598	1775±180	-	6,97	5,81	454
590±40	684	605±75	950±100	6,30	3,62	678
700±220	530	1070±140	1535±90	6,96	5,60	390

\*OYH<sub>MSA</sub> (g UKM<sub>beslenen</sub>/L.gün)

Aritma çamurlarına MSA ilavesiyle çoklu anaerobik çürütme performansına etkisinin belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışma literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve Çizelge 4.3’de özetlenmiştir.

Gomez ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada PÇ ile MSA atıklarının anaerobik çürütülmesi sonucu 600-900 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen</sub> aralığında elde ettiğini ve mevcut çalışmadaki PÇ reaktörü için elde edilen SMÜ açısından uyumlu olduğunu göstermektedir.

Bouallagui ve ark. (2009), arıtma çamuru SÇ ve çoklu besiyeri MSA atıklarının birlikte mezofilik şartlarda kesikli anaerobik olarak çürütme performansı araştırdıkları çalışmasından SMÜ 610 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen</sub> ve UKM giderim verimini ise %85.4 olarak bulmuşlardır. Bu çalışmadaki SÇ reaktörü için elde edilen SMÜ ve UKM giderimi açısından yakın bir değer bulunmuş ve çalışmayla uyum sağlamıştır.

Sosnowski ve ark. (2003)’nin yaptığı çalışmada arıtma çamuru sadece KÇ fraksiyonunda kullanılmış ve mezofilik şartlarda MSA ile anaerobik çürütülmesinden 532 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen</sub> değerinde SMÜ elde edilmiştir. Bu çalışmada KÇ için reaktöründe SMÜ açısından daha iyi verim elde edilmiştir.

Benzer şekilde Cabbai ve ark. (2013) ve Fonoll ve ark. (2015)’in yaptığı çalışmalarda SMÜ’nin sırasıyla 300 ve 366 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen</sub> olarak elde edildiği ve mevcut çalışmadaki KÇ reaktörü için elde edilen değerler daha iyi olduğu görülmektedir.

900 mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen</sub> değeri ile Di Maria ve ark. (2015) daha iyi olarak görünse de % UKM giderim verimi %35 olup, bu çalışma için %78 oranında olduğu için daha iyi performans göstermiştir.

Literatürde yapılan benzer çalışmalardan elde edilen sonuçların farklı fakat yakın olması, ham çamur fraksiyonu ve karakteristiği, MSA’nın atık bileşimi ve karakteristiği, ayrışabilirlik özelliği, çoklu besiyeri karışım oranı, sıcaklık, HBS ve reaktörün işletimine bağlı olmasından kaynaklanabilir. Genel itibariyle elde edilen sonuçlar literatür verileri ile tutarlıdır.

Çizelge 4.3. Çalışmanın optimum sonuçlarının literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılması

Çamur ve Atık Tipi	OYH (gUKM <sub>MSA</sub> /L.gün)	Reaktör Tipi	Sıcaklık (°C)	HBS (gün)	SMÜ (mL CH <sub>4</sub> /gUKM <sub>bes</sub> )	UKM Verim (%)	Referans
KÇ:MSA	3,084	Yarı sürekli	36	17,3	532	23	(Sosnowski ve ark., 2003)
PÇ:MSA	3,8	Yarı sürekli	35-37	37	600-800	58	(Gomez ve ark., 2006)
KÇ:SA	0,68	Kesikli	25	15	680	63-65	(Anhuradha ve ark., 2007)
SÇ:MSA	2,46-2,51	Kesikli	35	10	610	85,4	(Bouallagui ve ark., 2009)
KÇ:MSA	2,09	Kesikli	37	30	365,5±30	47	(Cabbai ve ark., 2013)
KÇ:MA	3	Yarı sürekli	37	20	300	110	(Fonoll ve ark., 2015)
KÇ:MSA	1,46	Yarı sürekli	35±2	11	900	35	(Di Maria ve ark., 2015)
KÇ:MSA	0,585	Yarı sürekli	35	20	700±220	57	Yapılan Çalışma
PÇ:MSA	1,17	Yarı sürekli	35	20	650±50	63	Yapılan Çalışma
SÇ:MSA	1,17	Yarı sürekli	35	20	620±50	39	Yapılan Çalışma
KÇ:SA	0,44	Yarı sürekli	35	20	810±20	62	Yapılan Çalışma
PÇ:SA	0,33	Yarı sürekli	35	20	730±50	70	Yapılan Çalışma
SÇ:SA	0,44	Yarı sürekli	35	20	775±55	46	Yapılan Çalışma
KÇ:MA	0,84	Yarı sürekli	35	20	700±20	59	Yapılan Çalışma
PÇ:MA	0,84	Yarı sürekli	35	20	630±70	60	Yapılan Çalışma
SÇ:MA	0,84	Yarı sürekli	35	20	790±90	42	Yapılan Çalışma



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, arıtma çamurlarının MSA, MA ve SA atıkları ile birlikte mezofilik şartlarda stabilizasyonu incelenmiş, mevcut ve ayrık sistemdeki potansiyel sonuçları ile çoklu besiyeri ilavesinin anaerobik çürütme performansına ve stabilize çamurlara etkileri belirlenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Çalışma boyunca kontrol reaktörlerindeki en iyi SMÜ  $790 \pm 150$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> ile KÇ reaktöründen elde edilmiştir. PÇ ve SÇ reaktörlerinden elde edilen değerler ise sırasıyla  $650 \pm 100$  ve  $500 \pm 120$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> değerlerindedir.
2. MSA ilavesiyle birlikte anaerobik çürütme yapılan reaktörlerde en yüksek SMÜ değerleri PÇ için  $730 \pm 50$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> ile 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'ndan, SÇ için  $775 \pm 55$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> ile 0,44 g UKM-SA/L.gün OYH'ndan ve KÇ için  $830 \pm 80$  mL CH<sub>4</sub>/g UKM<sub>beslenen.gün</sub> ile 0,33 g UKM-SA/L.gün OYH'nda elde edilmiştir.
3. SMÜ verimi üzerinde SA, MA ve MSA'na göre daha etkilidir ve ayrışabilirliği daha yüksektir.
4. Kontrol reaktörlerindeki günlük optimum metan üretimi PÇ için  $1080 \pm 120$  mg/L, SÇ için  $205 \pm 50$  mg/L ve KÇ için  $760 \pm 190$  mg/L şeklinde gerçekleşmiş ve günlük metan üretimi arıtma tesislerinden görüldüğü gibi en fazla primer çamurda gerçekleşerek PÇ>KÇ>SÇ şeklinde azalan değerlerde elde edilmiştir.
5. MSA ile birlikte anaerobik çürütme yapılan reaktörlerde ise günlük maksimum metan üretimi 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'ndan elde edilmiş olup PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla  $2100 \pm 90$ ,  $1195 \pm 80$  ve  $1855 \pm 40$  mL/gün'dür. Bu değerler kontrol reaktöründeki PÇ'den %94, SÇ ve KÇ'den elde edilen değerlerden ise %100 daha fazla olarak gerçekleşmiştir. Mevcut ve ayrık sistem performansında günlük metan üretimi açısından en iyi SÇ reaktöründe etki göstermiş olup, üç çamur fraksiyonu için SÇ>KÇ>PÇ şeklinde gerçekleşmiştir.
6. UKM konsantrasyonları kontrol reaktörlerinde stabilize çamurda kararlı ve denge haline gelmiştir. Bununla birlikte UKM giderim verimleri de PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla %76, 60 ve 70 olarak elde edilmiştir. SÇ reaktöründeki UKM gideriminin PÇ ve KÇ'ye göre daha düşük olması, sistemde bakteri parçalamasının sınırlı

kalarak UKM birikiminin gerçekleşmediği şeklinde açıklanabilir. Çoklu besiyeri ile anaerobik çürütme yapılan reaktörlerde çıkış UKM konsantrasyonları üç çamur fraksiyonu için de değişen MSA içeriği ve OYH'na bağlı olarak artmış-azalmış olsa da işletimdeki stabilize çamurda en kararlı ve dengeli performansı SÇ reaktörü göstermiştir.

7. Çıkış UKM konsantrasyonunun artması UKM giderim veriminin azalmasıyla, UKM konsantrasyonunun azalması ise UKM giderim veriminin artmasıyla sonuçlanmıştır. Tüm OYH'ları arasından en iyi UKM giderimi 0,33 g UKM-SA/L.gün olarak SA ilavesinden elde edilmiştir ve ayrık sistem olarak maksimum etki PÇ'da gözlenmiştir. Dolayısıyla PÇ'un çoklu anaerobik çamur çürütmede ayrışabilirliğinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
8. SA beslemesinin yapıldığı işletimlerde UKM konsantrasyonu daha düşük olduğundan UKM giderimi MA beslemesinin yapıldığı işletimlere göre daha iyi verim göstermiştir.
9. Çalışma süresince kontrol reaktörlerindeki optimum pH değerleri 7,60-7,80 aralığında gerçekleşmiştir. Değişik fazlarda farklı MSA ilavesiyle anaerobik çürütülen reaktörlerin pH değerleri PÇ için 7,50-8,10, SÇ için 7,40-8,35 ve KÇ için 7,40-8,30 aralıklarında gerçekleştiği ve MSA'nın etkisine rağmen anaerobik çamur çürütme için sistem performansına uygun değerlerde olduğu ve bu değerlerde sistemin normal çalıştığı görülmüştür. MSA ilavesinin sistemde pH değişimine etkisi ayrık sistem olarak değerlendirildiğinde, SÇ reaktörünün MSA içeriği ve OYH'ndaki değişimlerinde PÇ ve KÇ'ye göre daha az etkilendiği ve daha stabil bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.
10. Kontrol reaktörlerinde çalışma boyunca UYA oluşumu gözlemlenmemiştir. 0,66 g UKM-SA/L.gün OYH'nda 12 g SA ile birlikte çürütülmesinde reaktörlerde toksik etki meydana gelmesi nedeniyle PÇ ve KÇ'de yüksek SÇ'de ise düşük seviyelerde UYA oluşmuştur. Bu işletimde oluşan toksisite, sebze atıklarından kaynaklı azotlu maddelerle ilişkilendirilmiştir.
11. Kontrol reaktörlerinde iletkenlik aralıkları PÇ, SÇ ve KÇ için sırasıyla 6.8-8.2, 4.9-6.0 ve 6.1-7.1 mS/cm olurken SÇ için en düşük ve KÇ için ara seviyede gerçekleşmiştir. Üç çamur fraksiyonu için elde edilen iletkenlik değerleri kontrolleri ile kıyaslandığında MSA reaktörlerinde değişen içerik ve OYH'larında (1,68 g UKM-MA/L.gün hariç) daha yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. Burada arıtma çamurlarının yanında çoklu besiyer olarak kullanılan MSA'lar, reaktörlerdeki TKM

konsatrasyonunu artırmış ve hidroliz hızının artmasına bağlı olarak iletkenlik değerlerinin de artmasıyla sonuçlanmıştır. OYH 1,68 g UKM-MA/L.gün olarak işletildiğinde üç çamur fraksiyonu için belirgin bir azalma gözlenmiştir. **Bu azalmanın nedeni işletimdeki MSA'nın sadece meyve bileşenleri içermesi ve ilave organik madde hidrolizi sırasında artan bakteriyel büyüme ile çözülmüş maddelerin bakteri yani çamur yapısına geçmesi ile açıklanmıştır.** Stabilize çamurun toprakta uygulanmasında iletkenlik değerleri, mikrobiyal aktiviteyi etkileyen önemli bir faktör olan tuzluluk parametresi ile ilişkilendirildiğinde, 1,68 g UKM-MA/L.gün OYH'nda MA beslemesi ile SÇ'nin kısıtlı olmak şartıyla kullanıma uygun olduğu, PÇ ve KÇ'nin ise bu işletimlerde uygun olmadığı tespit edilmiştir.

12. Üç çamur fraksiyonunun arasından hem kontrol hem de MSA ilavesiyle farklı işletimlerde en iyi susuzlaşma performansı stabilize KÇ'de gerçekleşmiştir. Susuzlaşma kabiliyeti çamurun içerisindeki bileşenlere göre değişiklik göstermekle birlikte anaerobik çürütücünün TKM-UKM gibi proses parametreleriyle doğrudan ilişkilidir.

Sistemin laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçları mevcut kentsel atıksu arıtma tesisinde uygulanabilirliği açısından değerlendirildiğinde, çoklu besiyeri olarak meyve ve sebze atıklarının anaerobik çamur çürütme performansına olumlu yönde etki gösterdiği söylenebilir. Genel olarak günlük metan üretimini artırdığı, SMÜ ve UKM giderim veriminin ise sabit kaldığı ya da daha düşük değerlerde gerçekleşerek etkisinin az olduğu belirlenmiştir. MSA ilavesinin anaerobik çamur çürütmede sistemin pH'sına etkisi bakımından sanılanın aksine uygun değerlerde gerçekleşmiştir. Doğru işletim seçildiğinde iletkenlik değerlerinde ciddi oranda azalma elde edilerek stabilize çamurun toprakta kullanımına katkı sağlayacaktır. Ayrık sistem olarak düşünüldüğünde, SÇ'nin çoklu besiyeri anaerobik çürütme performansı PÇ ve KÇ'ye göre değişen işletim şartlarında özellikle günlük metan üretimi açısından daha etkin olduğunu ve artan beslemelerle daha da yüksek değerlerde gerçekleşeceğini göstermiştir. Uzun vadede işletimi açısından değerlendirildiğinde SÇ'nin stabilizasyonu PÇ ve KÇ'ye kıyasla daha stabil ve kararlı bir performans sergileyecektir.

## 5.2 Öneriler

AAT'lerde mevcut olan çamur çürütücüler, optimum biyogaz üretimine ulaşmak yerine yalnızca çamur hacmini azaltmak içindir. Bu nedenle, çoklu besiyeri sistemi, atık su arıtma tesislerinin enerji üretimini arttırmaları ve çamur deşarjının azalmasıyla çevresel ayak izlerini azaltmaları için büyük bir fırsat olabilir.

AAT'lerde oluşan arıtma çamurlarının biyogaz verimini artırmak için MSA ikincil besiyeri olarak farklı içerik ve ayrışma özelliğine sahip olmasından dolayı mevcut ve ayrık anaerobik çürütücülerde kullanılabilir. Bu durumda,

- MA'nın metan üretimi üzerindeki etkisi özellikle yüksek OYH açısından SA'ndan daha iyidir.
- SA'nın SMÜ değeri daha yüksektir ancak OYH kısıtlıdır.

Sonraki çalışmalarda:

- MA, SA ve MSA farklı OYH değerlerinde kısıtlayıcı etki nedeni ve seviyesi belirlenerek optimum değerler ve toksisite giderim yöntemleri araştırılmalıdır.
- MA, SA ve MSA'nın farklı HBS değerlerinde ayrışabilirlik üzerindeki etki araştırılmalıdır.

Ülkemizde anaerobik çamur çürütme teknolojilerinin meyve ve sebze atıklarıyla birlikte kullanılarak biyogaz üretilmesi, hem temiz enerji üretimini sağlayacak hem de çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca proses sonucu stabilize olmuş arıtma çamuru da gübre ve toprak düzenleyici olarak kullanılabilir. Enerji bakımından dış ülkelere bağımlı olan Türkiye'de arıtma çamurlarının biyometanizasyonu ve meyve sebze atıklarıyla birlikte arıtımı, yenilenebilir enerji üretimi bakımından uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Büyük ölçekli tesislerde bu prosesin uygulanmasıyla sistemden elde edilen metanın elektrik enerjisine dönüştürülerek sistemde tekrar kullanılması, hem yenilenebilir enerji kaynaklarına hem de sürdürülebilir atık yönetimine katkı sağlayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji için devlet tarafından yeterince teşvik sağlandığı takdirde, yabancı ve özellikle yerli arıtma firmaları bu büyük pazardan pay alabilmek için harekete geçecektir. Bu sayede hem ülkemizin enerji açığı azaltılabilecek hem de istihdam yaratılabilecektir.

## KAYNAKLAR

- Anderson, G. ve Yang, G., 1992, Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration, *Water Environment Research*, 64 (1), 53-59.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L. ve Ahring, B. K., 2003. Applications of the anaerobic digestion process. In: Biomethanation II. Eds: Springer, p. 1-33.
- Anhuradha, S., Vijayagopal, V., Radha, P. ve Ramanujam, R., 2007, Kinetic studies and anaerobic co-digestion of vegetable market waste and sewage sludge, *CLEAN–Soil, Air, Water*, 35 (2), 197-199.
- APHA, 2005, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association (APHA), *American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF)*, 21st Edition (Washington, USA.).
- Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J. ve Dewil, R., 2008, Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, *Progress in energy and combustion science*, 34 (6), 755-781.
- Arhoun, B., Villen-Guzman, M., Gomez-Lahoz, C., Rodriguez-Maroto, J. M., Garcia-Herruzo, F. ve Vereda-Alonso, C., 2019, Anaerobic co-digestion of mixed sewage sludge and fruits and vegetable wholesale market waste: Composition and seasonality effect, *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100848.
- Astals, S., Peces, M., Batstone, D., Jensen, P. ve Tait, S., 2018, Characterising and modelling free ammonia and ammonium inhibition in anaerobic systems, *Water research*, 143, 127-135.
- Beurskens, L. W., Hekkenberg, M. ve Vethman, P., 2011, Renewable energy projections as published in the national renewable energy action plans of the European member states, *ECN and EEA*.
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Romdan, E. B., Rachdi, B. ve Hamdi, M., 2009, Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition, *Journal of environmental management*, 90 (5), 1844-1849.
- Braun, R. ve Wellinger, A., 2003, Potential of co-digestion, *IEA Bioenergy, Task*.
- Cabbai, V., Ballico, M., Aneggi, E. ve Goi, D., 2013, BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge, *Waste management*, 33 (7), 1626-1632.
- Cao, Y. ve Pawłowski, A., 2012, Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3), 1657-1665.
- Chakraborty, D., Karthikeyan, O. P., Selvam, A. ve Wong, J. W., 2018, Co-digestion of food waste and chemically enhanced primary treated sludge in a continuous stirred tank reactor, *Biomass and Bioenergy*, 111, 232-240.
- Chen, Y., Cheng, J. J. ve Creamer, K. S., 2008, Inhibition of anaerobic digestion process: a review, *Bioresourcetechnology*, 99 (10), 4044-4064.
- De Baere, L. ve Mattheeuws, B., 2013, Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe–Status, experience and prospects, *ISTANBUL3WCONGRESS 2013*, 38.
- Di Maria, F., Sordi, A., Cirulli, G. ve Micale, C., 2015, Amount of energy recoverable from an existing sludge digester with the co-digestion with fruit and vegetable waste at reduced retention time, *Applied energy*, 150, 9-14.
- Dicle, B., 2012, Yemekhane ve hayvansal kaynaklı farklı organik katı atıkların birlikte termofilik ve aşırı termofilik ortamda havasız arıtımının incelenmesi, Yüksek

- lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı*, 131.
- Elalami, D., Carrere, H., Monlau, F., Abdelouahdi, K., Oukarroum, A. ve Barakat, A., 2019, Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109287.
- Erdirençelebi, D., 2017, Biyolojik nütrient giderimi ve anaerobik arıtım ders notları, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*.
- ETKB, Türkiye'nin Biyokütle Kaynakları, <https://www.enerji.gov.tr/TR/Sayfalar/Biyokutle>, [Ziyaret Tarihi: 21.12.2019].
- Fang, Z., Smith, R. L. ve Qi, X., 2015. Production of biofuels and chemicals with ultrasound, Springer, p.
- Filibeli, A., 2017, Arıtma Çamurlarının İşlenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, p. (291), 1-29, 67-121.
- Fonoll, X., Astals, S., Dosta, J. ve Mata-Alvarez, J., 2015, Anaerobic co-digestion of sewage sludge and fruit wastes: evaluation of the transitory states when the co-substrate is changed, *Chemical Engineering Journal*, 262, 1268-1274.
- Ganesh, R., Torrijos, M., Sousbie, P., Lugardon, A., Steyer, J. P. ve Delgenes, J. P., 2014, Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: comparison of start-up, reactor stability and process performance, *Waste management*, 34 (5), 875-885.
- Gerardi, M. H., 2003. The microbiology of anaerobic digesters, John Wiley & Sons, p.
- Gokcol, C., Dursun, B., Alboyaci, B. ve Sunan, E., 2009, Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey, *Energy Policy*, 37 (2), 424-431.
- Gomez-Lahoz, C., Fernandez-Gimenez, B., Garcia-Herruzo, F., Rodriguez-Maroto, J. ve Vereda-Alonso, C., 2007, Biomethanization of mixtures of fruits and vegetables solid wastes and sludge from a municipal wastewater treatment plant, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42 (4), 481-487.
- Gomez, X., Cuetos, M., Cara, J., Moran, A. ve Garcia, A., 2006, Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate, *Renewable energy*, 31 (12), 2017-2024.
- Gökalp, H. Y., 1983, Et ürünlerinde nitrat, nitrit kullanımı ve nitrit zehirlenmesi, *GIDA*, 8 (5).
- Grando, R. L., de Souza Antune, A. M., Da Fonseca, F. V., Sánchez, A., Barrena, R. ve Font, X., 2017, Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 44-53.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C. ve Lu, X., 2017, Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485-1496.
- Hwu, C.-S. ve Lettinga, G., 1997, Acute toxicity of oleate to acetate-utilizing methanogens in mesophilic and thermophilic anaerobic sludges, *Enzyme and microbial technology*, 21 (4), 297-301.
- Iacovidou, E., Ohandja, D.-G. ve Voulvoulis, N., 2012, Food waste co-digestion with sewage sludge—realising its potential in the UK, *Journal of environmental management*, 112, 267-274.
- İlkılıç, C. ve Deviren, H., 2011, Biyogazın Oluşumunu Etkileyen Fiziksel Ve Kimyasal Parametreler, *6th International Advanced Technologies Symposium*, 16-18.

- Karthikeyan, O. P., Trably, E., Mehariya, S., Bernet, N., Wong, J. W. ve Carrere, H., 2018, Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: a review, *Bioresource technology*, 249, 1025-1039.
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T. ve Dawson, L., 2011, Review: The anaerobic digestion of solid organic waste, *Waste management*, 31, 1737-1744.
- Khanal, S. K., 2011. Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications, John Wiley & Sons, p.
- Klein, J., 2002, Anaerobic Wastewater Treatment–the Anaerobic Digestion of Lipids, *Tampere University of Technology, Department of Environmental Engineering*.
- Kossmann, W. ve Pönitz, U., 2011, Biogas Digest: Volume I-Biogas Basics.
- Kwietniewska, E. ve Tys, J., 2014, Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 491-500.
- Le, N. T., Julcour-Lebigue, C. ve Delmas, H., 2015, An executive review of sludge pretreatment by sonication, *Journal of Environmental Sciences*, 37, 139-153.
- Liu, D. H. ve Liptak, B. G., 1999. Environmental engineers' handbook, CRC press, p.
- Mata-Alvarez, J., 2002. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, IWA publishing, p.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S. ve Astals, S., 2011, Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling, *Critical reviews in biotechnology*, 31 (2), 99-111.
- Mata-Alvarez, J., Mace, S. ve Llabres, P., 2000, Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives, *Bioresource technology*, 74 (1), 3-16.
- Metcalf&Eddy., 2002, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th Ed.), *McGraw-Hill Science/Engineering/Math*.
- Monnet, F., 2003, An introduction to anaerobic digestion of organic wastes, *Remade Scotland*, 379, 1-48.
- Muclu, A., 2012, Arıtma tesisi atık çamurlarının anaerobik kontakt reaktör ile arıtımı, Yüksek lisans tezi, *Gebze yüksek teknoloji enstitüsü çevre mühendisliği anabilim dalı*, 63.
- Nagamani, B. ve Ramasamy, K., 1999, Biogas production technology: an Indian perspective, *Current Science*, 44-55.
- Nghiem, L. D., Koch, K., Bolzonella, D. ve Drewes, J. E., 2017, Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: bottlenecks and possibilities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 354-362.
- Öztürk, İ., 2007, Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, *Su Vakfı Yayınları, İstanbul*, 479
- Parkin, G. F. ve Owen, W. F., 1986, Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges, *Journal of environmental engineering*, 112 (5), 867-920.
- Prabhu, M. S. ve Mutnuri, S., 2016, Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste, *Waste management & research*, 34 (4), 307-315.
- Pramanik, S. K., Suja, F. B., Zain, S. M. ve Pramanik, B. K., 2019, The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints, *Bioresource Technology Reports*, 100310.
- Resmi Gazete, 2010, Çevre ve Orman Bakanlığı, Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik, Resmi Gazete 27661, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/08/20100803-5.htm>.

- Resmi Gazete, 2005, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretim Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 5346, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/05/20050518-1.htm>.
- Rizk, M. C., Bergamasco, R. ve Tavares, C. R. G., 2007, Anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste and sewage sludge, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5 (1).
- Scano, E. A., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V. ve Cocco, D., 2014, Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant, *Energy conversion and management*, 77, 22-30.
- Schnurer, A. ve Jarvis, A., 2010, Microbiological handbook for biogas plants, *Swedish Waste Management U*, 2009, 1-74.
- Shi, S., Xu, G., Yu, H. ve Zhang, Z., 2018, Strategies of valorization of sludge from wastewater treatment, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93 (4), 936-944.
- Sosnowski, P., Wieczorek, A. ve Ledakowicz, S., 2003, Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes, *Advances in Environmental Research*, 7 (3), 609-616.
- Spinosa, L. ve Vesilind, P. A., 2001. Sludge into biosolids, IWA publishing, p.
- Tandukar, M. ve Pavlostathis, S. G., 2015, Co-digestion of municipal sludge and external organic wastes for enhanced biogas production under realistic plant constraints, *Water research*, 87, 432-445.
- Uzun, P. ve Bilgili, U., 2011, Arıtma çamurlarının tarımda kullanılma olanakları, *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25 (2), 135-146.
- Wong, J., Li, K., Fang, M. ve Su, D., 2001, Toxicity evaluation of sewage sludges in Hong Kong, *Environment international*, 27 (5), 373-380.
- Yaralı, E., 2017, Meyve ve Sebze Teknolojisi-1, *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Ders Notu*, 236.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Fatmanur SARIKAYA  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Konya-01.06.1994  
**Telefon** : 0506 894 81 44  
**Faks** :  
**E-Posta** : [fatmanursarikaya.94@gmail.com](mailto:fatmanursarikaya.94@gmail.com)

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Konya Merkez Anadolu İmam Hatip Lisesi, Karatay	2012
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2017
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2020

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2015	Konya Meram Belediyesi/Konatık-Gözde Plastik Geri Dönüşüm, Meram Geri Kazanım Projesi	Eğitim Personeli
2015-2016	Konya Karatay Belediyesi/Konatık-Gözde Plastik Geri Dönüşüm, Karatay Geri Kazanım Projesi	Eğitim Personeli

### UZMANLIK ALANI

Çevre Mühendisliği

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### YAYINLAR

Fatmanur Sarıkaya, Dilek Erdirençelebi, 2019, The Effect of Vegetable And Fruit Waste on Anaerobic Sludge Digestion Performance, International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER), Konya, Turkey, May 25- 27, Abstract Book of ISESER 2019. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)