

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TRAVERTEN MİKROBİYAL TOPLULUKLARIN
KARBONDİOKSİT YAKALAMA POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

Elvan Burcu KOŞMA

DOKTORA TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Mayıs, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAVERTEN MİKROBİYAL TOPLULUKLARIN
KARBONDİOKSİT YAKALAMA POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Elvan Burcu KOŞMA tarafından hazırlanan tez çalışması 09.05.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet DEMİR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gamze VARANK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Osman Atilla ARIKAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman ÖVEZ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Traverten Mikrobiyal Toplulukların Karbondioksit Yakalama Potansiyelinin Değerlendirilmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Elvan Burcu KOŞMA

İmza



Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FBA-2021-4517” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme,

TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca kıymetli yardımları ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA'ya süreç boyunca sağladığı yenilikçi bakış açısı ve yol göstericiliği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan, değerli vakitlerini ayıran ve görüşleri ile çalışmalarına yön veren değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet DEMİR'e ve Prof. Dr. Osman ARIKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım için gerekli maddi desteği sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'ne (YTÜ BAP, FBA-2021-4517) teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmasını kapsayan BAP projesinde yürütücülük görevini üstlenerek projenin her aşamasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Neslihan MANAV DEMİR'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışması için ihtiyaç duyulan numunelerin toplanabilmesi için gerekli olan Pamukkale seyahatinde yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Dr. Arş. Gör. Hülya CİVELEK YÖRÜKLÜ'ye teşekkür ederim.

Tez çalışması için gerekli su ve bakteriyolojik örnekleri toplamak için destek veren Pamukkale Üniversitesi Araştırma Görevlisi Dr. Meltem AYDIN KIZILKAYA'ya müteşekkirim.

Türk-Alman Üniversitesi'nde SEM-EDS ve XRD analizlerini gerçekleştirme sürecinde bana her türlü yardımı sağlayan Burak EVREN, Mehmet Turan GÖRÜRYILMAZ ve Serra Melek AKYÜZ'e ölçümler hakkındaki her sorumu içtenlikle yanıtladıkları, sabırları ve kıymetli zamanlarını bana ayırdıkları için çok teşekkür ederim. Mikrobiyal çalışmaların gerçekleştirilmesi esnasında fikirleri ve önerileri ile çalışmalarına önemli katkılar sağlayan Arş. Gör. Ogün MORKOÇ'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Burada isimlerini sayamadığım Türk-Alman Üniversitesi Fen Fakültesi'ndeki sevgili mesai arkadaşlarıma da sağladıkları manevi destekleri için içtenlikle teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım süresinde maddi ve manevi her türlü desteğini esirgemeyen değerli aile üyelerime şükranlarımı sunarım, iyi ki varsınız.

Elvan Burcu KOŞMA

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	v
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Küresel ve Bölgesel İklim Politikalarına Genel Bakış.....	1
1.2 Karbon Yakalama ve Faydalı Ürün Üretimi Konusunun Ülkemiz Açısından Önemi.....	3
1.3 Tezin Kapsamı, Amacı ve Araştırma Soruları	4
2 LİTERATÜR ÖZETİ VE TEMEL BİLGİLER	6
2.1 Mikrobiyal Kalsit Çökeltimi	6
2.1.1 Çeşitli kalsiyum karbonat kristal yapıları ve fizikokimyasal çökeltme mekanizması.....	6
2.1.2 Mikrobiyal yollarla kalsiyum karbonat çökeltimi mekanizmaları	8
2.1.3 Üre hidrolizi ile kalsit çökeltimi.....	9
2.1.4 Mikrobiyal kalsit çökeltiminin biyokütle-enerji tesisleri ile entegrasyonunun avantajları.....	12
2.2 Yiyecek Atıklarından Enerji Üretimi	13
2.2.1 Atıktan enerji üretim stratejileri	17
2.3 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi	23
2.3.1 Amaç ve kapsamın tanımlanması.....	24
2.3.2 Envanter analizinin gerçekleştirilmesi	24
2.3.3 Etkilerin değerlendirilmesi.....	26
2.3.4 Yaşam döngüsü yorumlaması	26
3 MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1 Bakteri Numunelerinin Alınması, Zenginleştirilmesi ve Analizleri	27

3.1.1 Numunelerin alınması	27
3.1.2 Bakterilerin zenginleştirilmesi	28
3.1.3 Üreaz enziminin tespiti	29
3.1.4 Bakterilerin besiyerlerinde çoğalmalarının incelenmesi	29
3.1.5 Üreaz enzim aktivitesinin tespiti	29
3.1.6 Mikrobiyal tür analizi.....	30
3.1.7 Bakteriyel çökeleklerin XRD, SEM ve EDX analizleri.....	31
3.2 Farklı Basınç ve Karbondioksit Oranları ile Sistemin Kurulması ve İşletilmesi	32
3.3 Bakteriyel Kum Tıkanması Deney Düzeneklerinin Kurulması ve İşletilmesi	32
3.3.1 Kum kolonlarında oluşan kalsiyum karbonat miktarının tayini.....	33
3.4 Atıktan CO ₂ ve Enerji Üretimi Potansiyelinin Belirlenmesi	34
3.4.1 Yemek atıklarının ön işleme	34
3.4.2 Uçucu katı madde tayini.....	34
3.4.3 Biyokimyasal metan potansiyeli testi.....	36
3.4.4 Üst ısı değeri tayini	38
3.4.5 Yiyecek atıklarının elemental analizi.....	38
3.5 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Çalışmaları	39
3.5.1 Atıktan enerji üretim stratejileri için fonksiyonel birim ve sistem sınırlarının belirlenmesi	39
3.5.2 Mikrobiyal kalsit çökelişi için sistem sınırlarının belirlenmesi ve ölçeklendirme	42
4 MİKROBİYAL KALSİT ÇÖKELMESİ	45
4.1 Su Kaynaklarına Ait Su Kalitesi Parametreleri Analiz Sonuçları.....	45
4.2 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeleğin SEM, EDX ve XRD analiz sonuçları	45
4.3 Üreaz Testi Sonuçları.....	47
4.4 Çoğalma Kinetiği Sonuçları.....	48
4.5 İnkübasyon Süresi Sonundaki pH değişimleri	50
4.6 Üreaz Aktivitesi Testi Sonuçları	50
4.7 İnkübasyon Esnasında Sıvı Medyadaki Kalsiyum Konsantrasyonunun Değişimi	51

4.8	Mikrobiyal Tür Analizi Sonuçları.....	51
4.9	İnkübasyon Sonucu Elde Edilen Çökeleklerin XRD, SEM ve EDX Analizi Sonuçları	53
4.10	Farklı Basınç ve Karbondioksit Oranları ile Sistemin İşletilmesi Sonuçları	56
4.11	MKÇ Prosesinin Alternatif Uygulamalarda Kullanılabilirliğinin Test Edilmesi	56
4.11.1	Kum kolonu sonuçları.....	56
4.12	Ölçeklenen MKÇ Prosesinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları	58
4.13	Ölçeklenen MKÇ ve Kalsit Minerali Çıkarılması Proseslerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçlarının Kıyaslanması	60
5	YİYECEK ATIKLARINDAN ENERJİ ÜRETİMİNDE MKÇ İLE KARBON YAKALAMA	64
5.1	Atıktan CO ₂ ve Enerji Üretimi Potansiyelinin Belirlenmesi	64
5.1.1	Yiyecek atığının fizikokimyasal analiz sonuçları	64
5.1.2	BMP sonuçları.....	64
5.2	Yiyecek Atıklarından Enerji Üretimi Sonucunda Açığa Çıkan Karbondioksitin MKÇ ile Tutulması Proseslerinin Çevresel Açından Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları	69
5.2.1	MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretiminin YDD sonuçları.....	69
5.2.2	MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretiminin YDD sonuçları.....	71
5.2.3	MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyon ile enerji üretiminin YDD sonuçları.....	73
5.2.4	MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyon ile enerji üretiminin YDD sonuçları.....	76
5.2.5	Atıktan enerji üretimi stratejileriyle birleştirilmiş MKÇ prosesinin YDD sonuçlarının temel senaryo ile kıyaslanması	78
6	SONUÇ	82
6.1	Bulgular.....	82
6.2	Öneriler	85
6.3	Çalışmanın Potansiyel Alternatif Kullanım Stratejileri	86
6.3.1	Ağır metal giderimi	86
6.3.2	Toprak stabilizasyonu	87
6.3.3	Tarihi eserlerin, yapıların ve fosillerin restorasyonu	87

6.3.4 Çimentolaştırma ve kendi kendini iyileştiren yapı malzemesi	88
6.4 Sonuçlar ve Çalışmanın Kazanımları.....	90
KAYNAKÇA	93
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	106



KISALTMA LİSTESİ

AK	Arazi kullanımı
BMP	Biyometanizasyon Potansiyeli Testi
DE	Deniz ekotoksitesitesi
DÖ	Deniz ötrofikasyonu
İPMO	İnce partikül madde oluşumu
İR	İyonlaştırıcı radyasyon
KA	Karasal asidifikasyon
KE	Karasal ekotoksitesite
KIP,insan	Küresel ısınma potansiyeli, insan sağlığı
KIP,karasal	Küresel ısınma potansiyeli, karasal ekosistem
KIP,sucul	Küresel ısınma potansiyeli, sucul ekosistem
KOT,insan	Kanserojen olmayan toksisite, insan
KT,insan	Kanserojen toksisite, insan
MKÇ	Mikrobiyal Kalsit Çökelimi
OO	Ozon oluşumu, insan sağlığı
OO,karasal	Ozon oluşumu, karasal ekosistem
SOTİ	Stratosferik ozon tabakasının incelenmesi
ST	Su tüketimi, insan sağlığı
ST,karasal	Su tüketimi, karasal ekosistem
ST,sucul	Su tüketimi, sucul ekosistem
TSE	Tatlı su ekotoksitesitesi
TSÖ	Tatlı su ötrofikasyonu
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Kalsiyum karbonatın polimorf yapıları; kalsit, aragonit ve vaterit [24]...	6
Şekil 2.2	Kalsiyum karbonat yapılarının elektron mikroskobu görüntüleri [26].	7
Şekil 2.3	Erken metastabil aşamada sıcaklığa bağlı kalsiyum karbonat polimorflarının değişimi [27].....	7
Şekil 2.4	Sıvı çözeltide pH'a bağlı alkalinite değişimi [29].....	8
Şekil 2.5	Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ve payları; (a) Jeotermal, rüzgâr, katı biyokütle, güneş, biyogaz ve atık kaynakları [76].....	14
Şekil 2.6	2020 yılı enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı [77].	14
Şekil 2.7	Yıllık atık üretiminin ülkelere göre dağılımı ve organik madde miktarının değişimi [74].	15
Şekil 2.8	Atık yönetimi hiyerarşisi [67].	15
Şekil 2.9	Evsel atıklardan enerji/yakıt üretim stratejileri ve ürünleri [61].	17
Şekil 2.10	Gazifikasyon adımları [95].....	20
Şekil 2.11	Gazlaştırıcıların sınıflandırılması ([90]'daki bilgilere uygun olarak oluşturulmuştur).....	20
Şekil 2.12	Biyometanizasyon adımları [61].	21
Şekil 2.13	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Çerçevesi [109].	23
Şekil 2.14	Envanter Analizi Akış Şeması [110].	25
Şekil 2.15	Envanter Analizi Proses Aşamaları Örnek Sınıflama Sistemi ([111]'deki binaların LCA'sına ait tablodan uyarlanarak geliştirilmiştir).....	25
Şekil 3.1	Numune alımı esnasında çekilmiş, Su Kaynaklarına ait görüntüler (Soldan sağa doğru sırasıyla; Traverten Kaynağı, Traverten Havuzları ve Kırmızı Su).....	27
Şekil 3.2	Numune noktalarının uydu konumları	28
Şekil 3.3	Farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış kalibrasyon çözeltileri	30
Şekil 3.4	Amonyum klorit çözeltisi ile fenol-hipoklorit test metoduna göre elde edilen kalibrasyon eğrisi	30
Şekil 3.5	Kullanılan SEM/EDX (solda) ve XRD (sağda) cihazları.....	31
Şekil 3.6	Deney setinin kurulumu ve beslemelerde kullanılan destek ayakları (solda), inkübatöre yerleştirilen deney seti (sağda)	33
Şekil 3.7	Yiyecek atıklarının ön işlemi; (a) yiyecek atıklarının kurutulması, (b) deneyde kullanılan öğütücü, (c) 2 mm'lik elek ve (d) elenmiş toz numune.....	34
Şekil 3.8	Uçucu katı madde tayini işleminde kullanılan cihaz ve ekipmanlar; (a) kül fırını, (b) hassas terazi, (c) krozeler ve (d) desikatör	35

Şekil 3.9 Hazırlanan serum şişelerinden bir kesit.....	36
Şekil 3.10 Serum şişelerinde oluşan gazın şırınga ile alınması.....	37
Şekil 3.11 GC Cihazı	38
Şekil 3.12 Biyometanizasyon prosesi sistem sınırları	40
Şekil 3.13 Yakma prosesi sistem sınırları	40
Şekil 3.14 Piroliz prosesi sistem sınırları	41
Şekil 3.15 Gazifikasyon prosesi sistem sınırları.....	41
Şekil 3.16 MKÇ teorik tesis modeli sistem sınırları.....	42
Şekil 4.1 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeleğe ait XRD sonuçları (C: Kalsit).....	46
Şekil 4.2 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeleğe ait farklı noktalardan SEM görüntüleri; (a) 1000x büyütme, (b) 10000x büyütme, (c, d) iki farklı noktadan 25000x büyütme	46
Şekil 4.3 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeleğe ait EDX sonuçları.....	47
Şekil 4.4 Üreaz pozitif sonucu veren 5 numuneye ait çoğalma sonuçları (TK: Pamukkale Traverten Kaynağı, H: Pamukkale Traverten Havuzu, KS: Kırmızı Su Traverteni, ATCC: ATCC1832 besiyeri).....	48
Şekil 4.5 Havuz numunesinin farklı besiyerlerinde çoğalmaları.....	49
Şekil 4.6 ATCC1832 Besiyerinde farklı kaynaklara ait karışık kültürlerin çoğalmaları (TK: Pamukkale Traverten Kaynağı, H: Pamukkale Traverten Havuzu, KS: Kırmızı Su Traverteni, ATCC: ATCC1832 besiyeri).....	49
Şekil 4.7 5 numuneye ait fenol-hipoklorit test metoduna göre üreaz aktivitesi sonuçları.....	50
Şekil 4.8 İnkübasyon esnasında sıvı medyada kalsiyum konsantrasyonu değişimi.....	51
Şekil 4.9 Filum ve cins bakımından metagenomik analiz sonuçları; a) Traverten Kaynağından alınarak ATCC1832’de zenginleştirme, b) Traverten Havuzundan alınarak ATCC1832’de zenginleştirme.	52
Şekil 4.10 İnkübasyon süresi sonunda oluşan bakteriyel çökeklere ait XRD sonuçları (C: Kalsit, V: Vaterit).....	53
Şekil 4.11 ATCC1832 besiyeri ile inkübasyon sonrası oluşan bakteriyel çökeklere ait SEM görüntüleri; (a,b) Traverten Kaynak bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (c,d) Traverten Kaynak bakterilerinin 120 saat inkübasyonu, (e,f) Traverten Havuz bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (g,h) Traverten Havuz bakterilerinin 120 saat inkübasyonu.	54
Şekil 4.12 ATCC1832 besiyeri ile inkübasyon sonrası oluşan bakteriyel çökeklere ait EDX sonuçları; (a) Traverten Kaynak bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (b) Traverten Kaynak bakterilerinin 120 saat inkübasyonu, (c) Traverten Havuz bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (d) Traverten Havuz bakterilerinin 120 saat inkübasyonu.	55
Şekil 4.13 Basınçlandırmaya bağlı karbondioksit tüketimlerindeki değişim	56

Şekil 4.14 7, 14 ve 21 günlük kum kolonu çalışmaları sonunda kalsiyum karbonat miktarlarının değişimi	57
Şekil 4.15 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	59
Şekil 4.16 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	59
Şekil 4.17 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	60
Şekil 4.18 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait yaşam döngüsü değerlendirmesi karakterizasyon sonuçları	61
Şekil 4.19 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait son nokta zarar değerlendirmesi sonuçları	62
Şekil 4.20 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait yaşam döngüsü değerlendirmesi normalizasyon sonuçları	62
Şekil 4.21 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait yaşam döngüsü değerlendirmesi ağırlıklandırma sonuçları	63
Şekil 5.1 5 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği.....	65
Şekil 5.2 2 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği.....	66
Şekil 5.3 1 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği.....	66
Şekil 5.4 0,25 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği.....	67
Şekil 5.5 0,5 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği.....	67
Şekil 5.6 0,75 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği.....	68
Şekil 5.7 0,25 g (1,015 g UKM/g UKM aşısı), 0,5 g (1,86 g UKM/g UKM aşısı), 0,75 g (2,79 g UKM/g UKM aşısı), 1 g (3,72 g UKM/g UKM aşısı), 2 g (7,44 g UKM/g UKM aşısı) ve 5 g (18,6 g UKM/g UKM aşısı) yemekhane atığı içeren reaktörlerde üretilen biyogazın CO ₂ ve CH ₄ içerikleri	68
Şekil 5.8 Mikrobiyal kalsit çökeli ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı.....	69
Şekil 5.9 Mikrobiyal kalsit çökeli ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı.....	70
Şekil 5.10 Mikrobiyal kalsit çökeli ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	71
Şekil 5.11 Mikrobiyal kalsit çökeli ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı.....	71

Şekil 5.12	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı.....	73
Şekil 5.13	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı.....	73
Şekil 5.14	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyonu ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı.....	74
Şekil 5.15	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyonu ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	74
Şekil 5.16	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyonu ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	75
Şekil 5.17	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyonu ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	77
Şekil 5.18	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyonu ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	77
Şekil 5.19	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyonu ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı	78
Şekil 5.20	1 kW.saat enerji ve 1 kg CaCO ₃ üretimi yapan farklı senaryoların çevresel etki değerlendirmesi karakterizasyon sonuçları.....	79
Şekil 5.21	Yiyecek atıklarının enerji eldesine ait son nokta zarar değerlendirmesi sonuçları.....	80
Şekil 5.22	Yiyecek atıklarından enerji eldesine ait yaşam döngüsü değerlendirmesi normalizasyon sonuçları.....	81
Şekil 5.23	Yiyecek atıklarından enerji eldesine ait yaşam döngüsü değerlendirmesi ağırlıklandırma sonuçları	81
Şekil 6.1	Mikrobiyal kalsit çökelimi ile entegre yiyecek atıklarından enerji dönüşümü sistemi için önerilen döngüsel ekonomi yaklaşımı	85
Şekil 6.2	Beton boşluklarının mikrobiyal kalsit çökelimi ile onarımına ait şematik gösterim; a) oluşan çatlak, b) mikrobiyal kalsit çökelimi yapabilen bakterilerin çatlakta çoğalması, c) mikrobiyal kalsit çökelimi ile oluşan kalsiyum karbonatın çatlakları birleştirmesi [143]......	88

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Mikrobiyal metabolizma, metabolik reaksiyonlar ve oluşan yan ürünler [34].	9
Tablo 2.2 Mikroorganizmalar, orijini, çoğaltma koşulları ve üreaz aktiviteleri.	10
Tablo 2.3 Atıktan enerji üretimi stratejilerinin maliyet ve çevresel etkileri [61].	18
Tablo 2.4 Biyokütlelerin fizikokimyasal ve yakıt özellikleri [91], [92].	18
Tablo 2.5 Farklı atıkların nem yüzdeleri [95], [107].	22
Tablo 3.1 Zenginleştirme medyaları ve içerikleri [112].	28
Tablo 3.2 BMP testi için kullanılan makronütrient besiyeri bileşenleri	37
Tablo 4.1 Su kaynaklarına ait su kalitesi parametrelerinin analiz sonuçları	45
Tablo 4.2 Stuart üre medyası ile yapılmış üreaz testi sonuçları	47
Tablo 4.3 Çoğaltma sonrasındaki pH değişimleri (120 saat sonunda)	50
Tablo 4.4 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları	58
Tablo 5.1 Yiyecek atığının fizikokimyasal bileşimi	64
Tablo 5.2 Reaktörlerin S/X oranları	64
Tablo 5.3 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları	70
Tablo 5.4 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları	72
Tablo 5.5 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyon ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları	75
Tablo 5.6 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyon ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları	76
Tablo 6.1 Mikrobiyal kalsit çökmesinin yapı malzemelerinde kullanımı ve bu çalışmalarda kullanılan bakteriyel türler	89

Traverten Mikrobiyal Toplulukların Karbondioksit Yakalama Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Elvan Burcu KOŞMA

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Mikrobiyal kalsit çökelimi (MKÇ) ile karbondioksit tutulmasının sağlanması atıktan-enerji üretiminin diğer yenilenebilir enerji türlerine kıyasla zayıf noktası olan çevresel sürdürülebilirlik ve emisyon problemine alternatif bir çözüm yolu oluşturur. Tahmin edilebileceği üzere, atıktan-enerji-üretimi prosesleri her ne kadar küresel enerji ihtiyacı ve atık yönetimi sorunlarına bütüncül bir şekilde yaklaşılması nedeniyle sürdürülebilirlik açısından ümit vaat ediyor olsa da, atıktan-enerji üretiminde organik maddeye bağlı formda bulunan karbonun atmosfere geri salınımının gerçekleşmesi nedeniyle oluşan karbondioksit emisyonu küresel iklim değişikliği açısından iyi bir görünüm ortaya koyamamaktadır.

Bu tez çalışması, mikrobiyal kataliz kullanarak karbondioksitin kalsiyum karbonat formunda faydalı bir ürüne dönüşümünü sağlayan MKÇ'yi temeline almakta olup iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk aşamada Denizli'de yer alan çeşitli traverten türü su kaynaklarından su ve mikrobiyal örnekler toplanarak farklı besiyerlerinde zenginleştirilmiş ve aralarından en iyi kalsit çökelimi yapabilen örnekler tespit edilmiştir. Çökeleklerle yapılan SEM-EDS ve XRD analizleri çökeleklerin vaterit

ve kalsit kristal yapısına sahip kalsiyum karbonata sahip olduğunu doğrulamıştır. Laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalar gerçek ölçeğe modellenmiş bu sistemin SimaPro 9.4.0.3 yazılımı vasıtasıyla Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) gerçekleştirilerek çevresel etkileri ortaya konulmuştur.

Tez çalışmasının ikinci kısmını oluşturan yiyecek atıklarının enerjiye dönüştürülmesi aşamasında seçilen yemekhane atıkları toplanarak fizikokimyasal analizleri gerçekleştirilmiş ve enerji dönüşüm potansiyelleri belirlenmiştir. Mikrobiyal kalsit çökeliminin yakma, piroliz, gazifikasyon ve biyometanizasyon ile enerjiye dönüştürülmesi sürecine dahil edilmesi durumlarına ait YDD'ler incelenerek bu kombine prosesler arasından en iyi senaryo tespit edilmiştir. Bu çalışma mikrobiyal kalsit çökeliminin atıktan-enerjiye-dönüşüm prosesleri ile birleştirilmesi durumunun çevresel ve sürdürülebilirlik açısından etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Bu tez çalışması kapsamında zenginleştirilen yerel türlerin sadece karbondioksit tutma amacıyla değil, aynı zamanda da toprak stabilizasyonu, atıksulardaki divalent metallerin arıtımı ve kendi-kendini-iyileştirebilen beton üretimi gibi çeşitli farklı alanlarda potansiyel kullanım alanları da bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikrobiyal kalsit çökmesi, karbon yakalama, kalsiyum karbonat, atıktan enerji üretimi, yaşam döngüsü değerlendirme.

Assessment of the Carbon Dioxide Capture Potential of Travertine Microbial Communities

Elvan Burcu KOŞMA

Department of Environmental Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Microbial calcite precipitation (MICP) and carbon dioxide (CO₂) capture represent pivotal strategies in addressing the dual challenges of waste-to-energy production and environmental sustainability. While waste-to-energy systems hold promise in meeting global energy demands and managing waste, they face a significant drawback due to CO₂ emissions during waste-to-energy transformation, contributing to global warming.

This thesis centers on MICP as a transformative process that harnesses microbial catalysis to convert emitted CO₂ into a valuable product, namely calcium carbonate. The microbial calcite precipitation process plays a crucial role in mitigating the environmental impact associated with biomass-to-energy conversion systems.

The study unfolds in two primary stages. In the experimental phase, water and microbial samples are collected from different travertine sources in Denizli, with subsequent identification of optimal microbial cultures through incubation. Analysis of resulting precipitates confirms the formation of calcite and vaterite type calcium carbonate, showcasing the efficacy of MICP in CO₂ sequestration. The findings from laboratory-scale experiments are then extrapolated to real-scale

systems and using life cycle assessment (LCA) methodologies comprehensive assessment of the overall environmental impact and sustainability benefits of MICP systems were analysed.

The second part of the study delves into the physicochemical analysis of cafeteria waste to assess its energy production potential. Subsequently, the environmental efficacy of MICP addition to different waste-to-energy strategies is compared to identify and determine the best strategy for combined energy generation and CO₂ capture. This study offers a comprehensive understanding of the overall environmental impact and sustainability benefits of MICP in waste-to-energy conversion processes. The local microbial species enriched through this study not only can be used in CO₂ capture and utilization but also possess the potential to be used in a wide variety of different research areas such as soil stabilization, treatment of divalent ions in wastewater, and self-healing concrete production.

Keywords: Microbial calcite precipitation, calcium carbonate, carbon capturing, waste-to-energy generation, life cycle assessment.

1.1 Küresel ve Bölgesel İklim Politikalarına Genel Bakış

Küresel anlamda Birleşmiş Milletler (BM), uluslararası iklim politikalarını şekillendirmede merkezi bir rol oynamakta, diğer ulusları iklim değişikliğinde karbon salınımını azaltım ve iklim değişimi stratejilerine uyum için işbirliğine teşvik etmek konusunda bir öncü konumunda yer almaktadır. Özellikle Paris iklim anlaşması sera gazı emisyonlarının azaltımı ve iklim değişimi mücadele politikalarının izlenmesi açısından ümit vaat edicidir [1]. Paris iklim anlaşması ve benzeri iklim politikaları temelde gelecek nesiller için daha iyi bir dünya bırakmayı hedefleyen, çevre ve küresel iklim değişikliği sorunlarının çözümü için alternatif stratejiler geliştirmeye yönelik çalışmaları içermektedir.

Avrupa Birliği (AB) de iklim değişikliği ile mücadele konusunda bölgesel açıdan oldukça önemli bir role sahiptir. İklim politikalarının uygulanması için AB'nin sahip olduğu ekonomik ve politik nüfuzun kullanımı sayesinde yenilenebilir enerji kullanımının teşviki, temiz teknolojilere geçiş ve emisyon azaltımını sağlama açısından Avrupa bölgesi ve çevre ülkelerin iklim politikalarını şekillendirmede oldukça etkili bir unsur olma potansiyeline sahiptir. AB'nin yaklaşımı genellikle iklim politikalarını ve standartlarını üye devletler arasında uyumlu hale getirmeyi, iç işbirliğini teşvik etmeyi ve aynı zamanda küresel iklim hedeflerini ilerletmek için dış ortaklıklara katılmayı içerir [2]. Bu manada BM uluslararası işbirliği için daha geniş bir forum sağlarken, AB'nin eylemlerinin bölgesel etki alanı dahilinde daha hedefe yönelik ve proaktif bir tutuma sahip olduğundan bahsedilebilir.

Avrupa Yeşil Mutabakatıyla somutlaştırılan, iklim kanunu ile yasal bir çerçeveye oturtulan iklim değişikliği hedefleri kapsamında Avrupa Birliği 2050 yılında ilk İklim-Nötr kıta olma hedefini gütmektedir [3]. Bu hedefe ulaşma açısından 2030 yılına kadar bir ara hedef olarak 1990 yılına kıyasla sera gazı emisyonlarını %55 oranında azaltımını gerçekleştirmeyi planlamaktadır [4].

AB'nin bu emisyon azaltımı hedeflerine ulaşmada kullanmakta olduğu araçlardan biri de sınırda karbon azaltımı mekanizmasıdır (SKDM; CBAM: Carbon Boarder Adjustment Mechanism) [5].

AB'nin "55'e uyum" olarak da bilinen 2021 yılında önerilen emisyonların %55'lik azaltımını içeren mevzuat değişikliği paketi içerisinde SKDM de yer almaktadır [6]. Bu tarih öncesinde AB içerisinde Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ile sistematik ve piyasa temelli bir mekanizma ile gerçekleştirilmesi planlanan emisyon azaltımlarının ETS mekanizması içerisinde yer alan belirli esneklik unsurlarının, karbon kaçağı olarak da isimlendirilen karbon emisyonlarının dış ülkelere kaydırılmasına sebebiyet vermesi, Avrupa Birliği ülkelerinin üretimlerinin emisyon sınırlamaları nedeniyle ithalatla rekabetinin zorlaşması gibi ve benzeri sorunlara SKDM bir çözüm yolu oluşturmaktadır [7]. Bu sayede AB'nin ETS kapsamında AB üreticilerinin karşılaştığı emisyon maliyetlerinin SKDM'ye tabi ürünlerin ithalatında da eşdeğer şekilde tahsil edilmesi sağlanarak karbon kaçağının önlenmesi ve Avrupa üretici sektörlerinin rekabet gücünün korunması hedeflenmektedir [8]. Diğer yandan SKDM Avrupa ile ticaret yapan ve gelecekte de bu ticaret faaliyetlerine devam etmek isteyen ulusları emisyon azaltımı stratejilerini geliştirme ve uygulama açısından teşvik edici bir unsur olma niteliği taşımaktadır.

Türkiye'nin iklim politikalarına dahil olması hem coğrafik konumu hem de mevcut ekonomi politikaları sayesinde gerçekleşmiş olmakla birlikte, ülkenin ulusal öncelikleri ile uluslararası taahhütlerinin bir karışımından meydana gelmektedir. Paris Anlaşmasının imzalayıcılarından biri olan Türkiye, bu imza ile ülkenin emisyonlarını azaltma ve daha sürdürülebilir bir enerji üretim politikasına geçişin de sözünü vermiştir [9]. AB'ye üye ülkelere olan ihracatta dünyada 6. Büyük ülke konumunda olan Türkiye [10] için SKDM'nin varlığı ise özellikle büyük bir öneme sahiptir. 2021 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP26) Türkiye'nin ETS'ye benzer bir sistemin ülkede oluşturulması için harekete geçmesinde büyük rol oynamış ve SKDM ile birlikte de bu süreç hızlanmıştır [9]. SKDM Türk üreticilerin ürün ve proseslerinin emisyonlarını azaltması açısından ciddi bir itici güç oluşturmaktadır.

Karbon emisyonlarının azaltılması bağlamında karbon yakalama teknolojilerinin önemi yadsınamayacak derecede fazladır. Karbon Yakalama, Kullanma ve

Depolama (KYKD; CCUS: Carbon Capture Utilisation and Storage) teknolojileri yüksek karbon emisyonu oluşturan proseslere sahip üretim tesislerinin emisyon azaltımlarını sağlamak için alternatif bir yol sağlamaktadır.

Karbon yakalama stratejilerinin AR-GE çalışmalarının yaygınlaştırılması ve bu kapsamda yapılacak olan yatırımlar bu teknolojilerin tam potansiyelinin ortaya çıkarılmasında ve küresel ölçekte düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi hızlandırmada oldukça önemlidir.

1.2 Karbon Yakalama ve Faydalı Ürün Üretimi Konusunun Ülkemiz Açısından Önemi

Türkiye’de küresel iklim hedeflerine uyum sağlama ve küresel emisyonlarda azalma hedeflerini yakalayabilmek adına karbon yakalama teknolojilerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Ocak 2023 yılında yayınlanan Türkiye Ulusal Enerji planında KYKD stratejilerinin kullanımı üzerinde durularak özellikle kömür ve doğalgaz santralleri odağından KYKD kullanımı değerlendirilmiştir [11]. Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası ile Türkiye Cumhuriyeti Sanayi Bakanlığı’nın ortaklaşa çalışması sonucunda Çelik, Alüminyum ve Çimento sektörleri için düşük karbonlu yol haritası çalışmaları oluşturulmuş ve bu sektörler için oluşturulan senaryolarda sektörler özelinde belirlenen hedef yıllar için KYKD kullanımına yer verilmiştir [12], [13], [14]. Özellikle çimento sektörü için toplam emisyonlarının %50,7 oranında düşürülebileceği ortaya konulmuştur [14].

Karbon yakalama ve kullanma (CCU) stratejileri, karbondioksit emisyonlarını yakalamayı ve bunları değerli ürünlere dönüştürmeyi amaçlayan bir dizi yenilikçi yaklaşımı kapsar. Bu sayede hem iklim değişimini önlemeye hem de kaynakların azalmasını önleme hedeflerine katkıda bulunur. Bu stratejiler Adsorpsiyon, Absorpsiyon, Membran ayırıştırma, Kimyasal yakalama gibi fiziko-kimyasal süreçler ile havadan karbondioksitin ayırıştırılmasıyla birlikte faydalı ürün olarak; polimer, karbonat, yakıt, biyokütle (alg vb.) ve solvent gibi çeşitli maddelerin üretimini hedefler [15].

Karbon yakalama teknolojileri çoğunlukla fizikokimyasal yollar izlenerek gerçekleştirilmekte olup, biyokimyasal yollar kullanılarak biyokütle veya yakıt

dışında bir faydalı ürün üretimi konusu ise üzerinde daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç duyulan bir alan olma niteliğini korumaktadır.

Tam da bu noktadan yola çıkılarak bu tez kapsamında ana odak noktası biyokimyasal mekanizmalarla karbon yakalama ve faydalı ürüne dönüştürme stratejilerinden biri olan Mikrobiyal Kalsit Çökmesi (MKÇ) olarak seçilmiştir. Bölüm 2.1’de detaylı olarak anlatılacak mikrobiyal kalsit çökmesi sayesinde karbonun yakalanması ve kalsiyum karbonata dönüştürülmesi mümkün olabilmektedir.

1.3 Tezin Kapsamı, Amacı ve Araştırma Soruları

Bu çalışmada, yiyecek atıklarının enerjiye dönüştürüldüğü ve emisyon meydana getiren sistemlerde mikrobiyal kalsit çökmesinin uygulanması kapsam olarak seçilmiş ve MKÇ için türler Denizli ilindeki traverten özellikli doğal su kaynaklarından alınmıştır. Bu seçimin ana sebebi temiz enerji kaynakları arasında sıralanan biyokütlenin atığa dönüştürülmesi proseslerinin bir gerçeği olan biyokütlenin içerisinde bağlı bulunan karbonun atmosfere salınımı probleminin azaltılması, bu sayede biyokütle-enerji dönüşüm teknolojilerinin diğer yenilenebilir enerji üretim stratejileriyle emisyon bakımından rekabet edebilecek seviyeye yerel mikrobiyal türler kullanılarak ulaştırılmasının hedeflenmesidir. Özetle bu çalışmada, tüm dünyada ilgi ile takip edilen CO₂ yakalama ve faydalı ürüne dönüşümü konusu, hem yerel bakterilerin zenginleştirilerek kullanılması, hem de tüm sürecin hammaddeden son ürüne kadar bir bütün olarak incelenmesi açılarından ele alınmıştır.

Bu çalışmayı oluşturan başlıca araştırma soruları şu şekildedir;

1. Kalsit üretiminin kendiliğinden gerçekleştiği, düşük mikrobiyal tür sayısı ile içme suyu karakteristiği sergileyen doğal bir kaynaktan alınan kültürler mikrobiyal kalsit çökmesinde kullanılmak üzere zenginleştirilebilir mi?
2. CO₂’nin hammadde olarak kullanıldığı MKÇ prosesinde faydalı ürün üretimi gerçekleştirilebilir mi? Oluşan atık CO₂ gazı, MKÇ gibi biyolojik proseslerde atık kategorisinden çıkarılarak hammadde kategorisine dönüştürülebilir mi?

3. Başta atıklardan enerji üretiminde olmak üzere, pek çok farklı endüstriyel sektörde oluşan CO₂ emisyonunun biyolojik prosesler vasıtasıyla tüketimi/azaltılması mümkün mü?
4. Basınçlandırma ile MKÇ'nin karbondioksit tutma verimi artırılabilir mi?
5. Bu çalışma Türkiye'nin iklim anlaşmaları ile belirlenen CO₂ emisyonu azaltma hedeflerine uyum sağlamasına yardımcı olabilir mi?

Bu tez çalışması, 6 ana bölümden oluşmakta olup, 1. bölümde iklim politikaları, karbon yakalamanın önemi ve tezde yürütülen çalışmaların amacı açıklanmıştır. 2. bölümde, Mikrobiyal Kalsit Çökelimi hakkında teorik bilgilerin yanı sıra literatürde daha önceden yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir ayrıca bu bölümde atıktan enerji üretimi ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi hususunda temel bilgiler de yer almaktadır. Çalışmalar sırasında yürütülen deneysel yöntemler hakkında detaylı bilginin verildiği 3. bölüm olan Materyal ve Yöntem bölümünün ardından, 4. bölümde Mikrobiyal Kalsit Çökelimi çalışmalarına ait sonuçlar paylaşılmıştır. 5. bölümde Mikrobiyal Kalsit Çökelmesinin yiyecek atıklarından farklı enerji üretimi stratejileri ile birlikte uygulanmasının yaşam döngüsü bakış açısıyla değerlendirilebilmesi için gereken çalışmalara ait sonuçlara yer verilmiştir. 6. bölümde ise çalışmanın tamamında elde edilen sonuçlar bir bütün olarak özetlenerek çalışma sonunda elde edilen çıktılarına bağlı öneriler ve bu çalışmanın potansiyel kullanım stratejileri anlatılmaktadır.

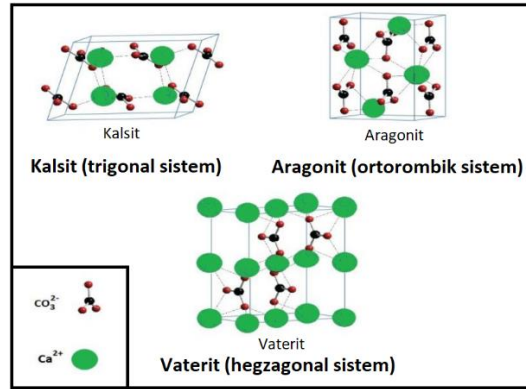
2 LİTERATÜR ÖZETİ VE TEMEL BİLGİLER

2.1 Mikrobiyal Kalsit Çökeltimi

Doğada kayalarda, mermer, kalker gibi taş türleri içerisinde bulunan kalsiyum karbonat (CaCO_3); boya, seramik, cam, kauçuk, çelik, boya üretimi, inşaat, içme suyu ve atıksu arıtımı, ilaç üretimi ve petrol işleme gibi birçok farklı endüstride kullanılmaktadır. Ayrıca kâğıt, plastik ve kaplama endüstrisi gibi pek çok farklı alanda da kullanılabilen bu faydalı ve çok yönlü ürün, mukavemet oluşumu ve dış ortam koşullarına direnci bakımından inşaat sektöründe yapılar için kritik öneme sahiptir [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

2.1.1 Çeşitli kalsiyum karbonat kristal yapıları ve fizikokimyasal çökeltme mekanizması

Kalsiyum karbonat doğada 3 farklı kristal formunda bulunabilmektedir. Bu formlar; trigonal yapıda olan kalsit, ortorombik yapıda olan aragonit ve hegzagonal yapıda olan vaterit'tir (Şekil 2.1).

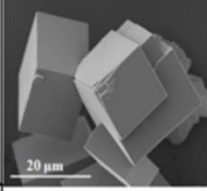
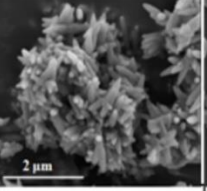
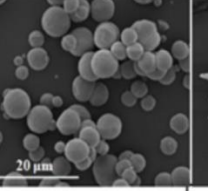
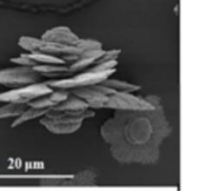


Şekil 2.1 Kalsiyum karbonatın polimorf yapıları; kalsit, aragonit ve vaterit [24].

Literatürde yaşlandırma süresi, kullanılan katkı maddesi, karıştırma/çalkalama hızı, doygunluk durumu gibi etmenlerin oluşacak kalsiyum karbonat polimorflarının türü ve miktarı üzerine bir etkisi olduğuna dair bulgular mevcuttur [25].

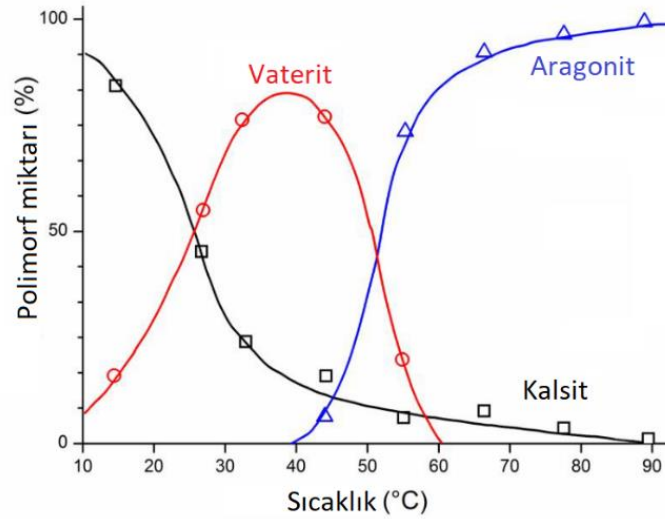
Literatürde SEM (Taramalı elektron mikroskobu) ile görüntülenen kalsiyum karbonatın farklı polimorflarının görüntüleri Şekil 2.2’de verilmiştir. Buradan da

görülebileceği üzere kalsit düzgün kristallendiğinde belirgin bir kübik yapı sergilerken, aragonit daha çok çubuk şeklinde dikenli yapılar oluşturmakta, vaterit ise ya küresel ya da çiçeksi denilebilecek şekillerde kristallenebilmektedir. Ancak aynı ortamda bu yapıların bir arada bulunması da mümkündür.

	Kübik yapı	Çubuksu yapı	Küresel yapı	Çiçeksi yapı
SEM Görüntüleri				
A	Kalsit (β -CaCO ₃)	Aragonit (λ -CaCO ₃)	Vaterit (μ -CaCO ₃)	Vaterit (μ -CaCO ₃)
B	Rombohedral	Ortorombik	Hegzagonal	Hegzagonal

Şekil 2.2 Kalsiyum karbonat yapılarının elektron mikroskobu görüntüleri [26].

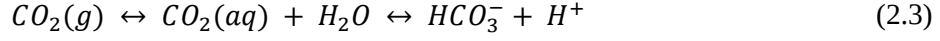
Erken metastabil aşamada sıcaklığa bağlı kalsiyum karbonat metaformlarının sıcaklık arttıkça sırasıyla kalsit, vaterit ve aragonit yapılarını oluşturduğu tespit edilmiştir [27]. Şekil 2.3'te buna ait dönüşüm grafiği verilmiştir. Bu yapıların ortamdaki koşullara bağlı olarak birbirleri arasında dönüşüm geçirmeleri mümkündür.



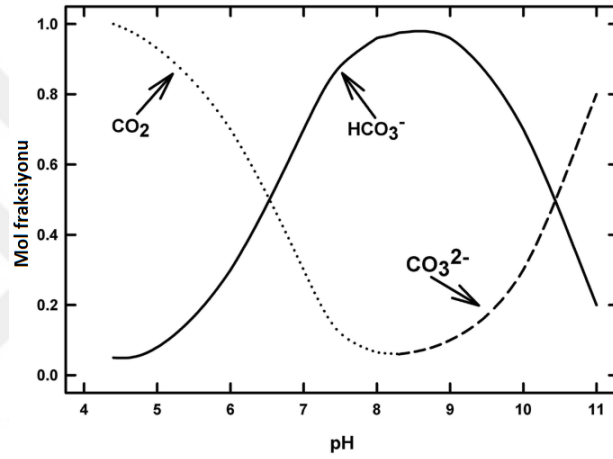
Şekil 2.3 Erken metastabil aşamada sıcaklığa bağlı kalsiyum karbonat polimorflarının değişimi [27].

Doğada mikrobiyal faaliyet dışı kalsiyum karbonatın oluşumu, aşırı doymuş kalsiyum ve karbonatın ortamda reaksiyonu ve sonrasında sıcaklık ve basınç değişimi etkisi ile çökmesi şeklinde gerçekleşir [28].

İnorganik kalsiyum karbonat çökmesi aşağıdaki reaksiyonlar vasıtasıyla gerçekleşmektedir;



Sıvı çözeltilerdeki alkalinite ve pH değişimleri kalsiyum karbonat çökmesi için sıcaklık ve basıncın yanında bir diğer unsuru teşkil etmektedir. pH attıkça karbondioksit önce bikarbonata dönüşür, pH 8’den itibaren de pH artışı ile birlikte bikarbonat miktarı azalır ve karbonat miktarı artışa geçer (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Sıvı çözeltilerde pH’a bağlı alkalinite değişimi [29].

Sıvı ortamda gerçekleşecek mikrobiyal faaliyet bu çökme mekanizmasını doğrudan etkileyebilmektedir. Mikroorganizmaların etkisiyle gerçekleşen kalsiyum karbonat oluşumu, mikrobiyal metabolizmanın etkisi nedeniyle “Mikrobiyal olarak indüklenen kalsiyum karbonat çökmesi” (MKÇ; MICP: Microbially Induced Calciumcarbonate Precipitation) olarak adlandırılmaktadır [30]. Bir atmosfer kirleticisi ve sera gazı olarak da bilinen CO₂’nin MKÇ yolu ile kalsiyum karbonat olarak çökertilmesi son yıllarda karbon yakalama potansiyeli açısından araştırmacıların dikkatini çekmektedir [31], [32].

2.1.2 Mikrobiyal yollarla kalsiyum karbonat çökelişi mekanizmaları

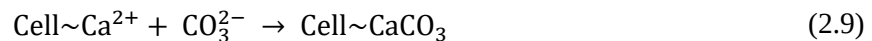
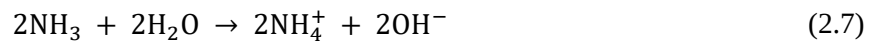
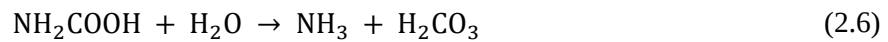
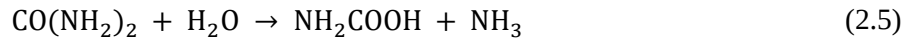
MKÇ temelde; fotosentez, sülfat indirgemesi, demir indirgemesi ve üre hidrolizi olmak üzere 4 farklı metabolik yol ile gerçekleşebilmektedir [33]. Bu metabolik yollara ait biyokimyasal reaksiyonlar ve oluşan yan ürünler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Mikrobiyal metabolizma, metabolik reaksiyonlar ve oluşan yan ürünler [34].

Mikrobiyal Metabolizma	Reaksiyon	Yan Ürün
Fotosentez	$2HCO_3^- + Ca^{2+} \rightarrow CH_2O + CaCO_3 + O_2$	O ₂ , CH ₂ O
Üre hidrolizi	$CO(NH_2)_2 + 2H_2O + Ca^{2+} + Cell \rightarrow 2NH_4^+ + Cell \sim CaCO_3$	NH ₄ ⁺
Denitrifikasyon	$CH_2COO^- + 2,6H^+ + 1,6NO_3 \rightarrow 2CO_2 + 0,8N_2 + 2,8H_2O$ $Ca^{2+} + CO_2(aq) + 2OH^- \rightarrow CaCO_3(s) + H_2O$	CO ₂ +N ₂ NO+N ₂ O
Amonifikasyon	$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$ $Ca^{2+} + HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H^+$	NH ₃
Sülfat İndirgenmesi	$SO_4^{2-} + 2[CH_2O] + OH^- + Ca^{2+} \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + 2H_2O + HS^-$	CO ₂ , HS ⁻

2.1.3 Üre hidrolizi ile kalsit çökelimi

Üre hidrolizinin Tablo 2.1’de verilen reaksiyon denklemi net reaksiyon denklemidir. Bu net reaksiyon aslında birkaç farklı alt reaksiyondan meydana gelmektedir. Denklem 2.5’te verildiği gibi, bakteriler tarafından öncelikle üre karbamik asit ve amonyağa dönüştürülür [35], [36]. Hemen ardından karbamik asidin suda hidrolizi ile (Denklem 2.6) amonyak ve karbonik asit ortaya çıkar [37]. Amonyak suda amonyum iyonuna dönüşür ve sıvı ortamda pH artışı gerçekleşir (Denklem 2.7). Sıvı ortamda serbest formda bulunan Ca²⁺ iyonları bakteri hücresinin yüzeyine birikir (Denklem 2.8) ve Denklem 2.9’da da verildiği gibi aynı sıvı ortamında CO₃²⁻ bulunduğu durumda bu iki iyon birleşerek CaCO₃’e dönüşür [38].



MKÇ metodu ile kalsiyum karbonat üretimi literatürde, *Sporosarcina pasteurii* suşu [39], *Bacillus pasteurii* ATCC 6453 bakterisi [40], *S. pasteurii* bakterisi [41], *Lysinibacillus fusiformis* U1 [42], *B. subtilis* [43], *B. aerius* [44], *B. megaterium* [45] ve *B. sphaericus* [46] gibi farklı türler kullanılarak incelenmiştir.

Ayrıca Okyay ve diğerlerinin 2016 yılında Pamukkale travertenleri üzerinde yaptıkları çalışmada, travertenlerde üreaz metabolik yolunu izleyerek kalsiyum karbonat üretimi yapan bakterilerin varlığı tespit edilmiştir. Karstik arazilerde mikrobiyal faaliyetler ile kalsiyum karbonat oluşumu arasında bir ilişkinin varlığı bilinmektedir [47].

Literatürde kalsiyum karbonat üreten bakteriler, bu bakterilerin izole edildikleri yer, çoğaltma koşulları ve üreaz aktiviteleri üzerine yapılmış çalışmalar Tablo 2.2’de özetlenerek verilmiştir.

Tablo 2.2 Mikroorganizmalar, orijini, çoğaltma koşulları ve üreaz aktiviteleri.

Bakteri	Bakteri orijini	Nütrient	pH	Sıcaklık	Üreaz aktivitesi	Ref.
<i>Bacillus pasteurii</i> ATCC 6453	-	3 g nütrient çözeltisi (Bacto), 20 g üre, 10 g NH ₄ Cl, 2.12 g NaHCO ₃	8	30°C / 25°C	76 µmol/dk	[40]
<i>Bacillus pasteurii</i> NCIM 2477	Endüstriyel Mikroorganizmalar Ulusal Koleksiyonu,	Nütrient çözeltisi, beyin kalp infüzyon medyası, 2% üre, 0.3% CaCl ₂	-	-	18 U/ml	[48]
<i>Brevibacterium ammoniagenes</i> ATCC 6871	Hindistan				14 U/ml	
<i>Bacillus lentus</i> 2466-NCIB 8773	Hindistan				11 U/ml	
<i>Sporosarcina pasteurii</i> MTCC 1761’ye ait fenotipik mutantlar	Mikrobiyal Teknoloji Enstitüsü, Hindistan	25.2 mM CaCl ₂ , 2%, w/v üre çözeltisi, 8 g nütrient çözeltisi	8	37°C	550 U/ml	[49]
<i>Sporosarcina pasteurii</i> NCIM 2477	Ulusal Kimyasal Laboratuvarı, Hindistan	10% LML, 5 g NaCl, 2% üre, 25 mM CaCl ₂	8	37°C	353 U/ml	[50]
		8 g nütrient çözeltisi, 5 g NaCl, 2% üre, 25 mM CaCl ₂			412 U/ml	
		1 g maya özütü, 5 g NaCl, 2% üre, 25 mM CaCl ₂			366 U/ml	
		1,5% CSL, 2% üre, 25 mM CaCl ₂			412 U/ml	[51]

Tablo 2.2 (devam) Mikroorganizmalar, orijini, çoğaltma koşulları ve üreaz aktiviteleri.

Bakteri	Bakteri orijini	Nütrient	pH	Sıcaklık	Üreaz aktivitesi	Ref .
<i>Kocuria flava</i> CR1	Bakırla kirletilmiş maden toprağı	2% üre, 25 mM CaCl ₂ , nütrient çözeltisi, 100 mg L ⁻¹ Cu	-	-	472 U/ml	[52]
<i>Sporosarcina ginsengisoli</i> CR5	Arsenikle kirletilmiş toprak	Nütrient çözeltisi, 2% üre, 25 mM CaCl ₂ , 50 mM As ₂ O ₃	8	30°C	412 U/ml	[53]
<i>Halomonas</i> sp. SR4	Maden toprağı	50 mL nütrient çözeltisi, 2% üre çözeltisi, 100 mg L ⁻¹ SrCl ₂ 6H ₂ O	-	30°C	374,5 U/ml	[54]
<i>Bacillus</i> sp. CT-5	Çimento	8 g nütrient çözeltisi, 2% üre, 25 mM CaCl ₂	8	37°C	550 U/ml	[55]
<i>B. megaterium</i>	Toprak	Nütrient çözeltisi, 5 µM NiCl ₂ , 2% üre	8	37°C	690 U/ml	[56]
<i>B. cereus</i>					587 U/ml	
<i>B. thuringiensis</i>					620 U/ml	
<i>B. subtilis</i>					515 U/ml	
<i>L. fusiformis</i>					525 U/ml	
<i>Pseudomonas fluorescens</i> ATCC 17575	Kirletilmiş denizsuyu	Tryptic Soy Broth	7,4	37°C	6,59 U/ml	[57]
<i>Sporosarcina pasteurii</i> ATCC 11859	Toprak	10 g/l tripton, 5 g/l maya ekstraktı, 4,5 g/l trisin, 5 g/l (NH ₄) ₂ SO ₄ , 2 g/l glutamik asit, 10 g/l üre		27°C	17,21 U/ml	
<i>Sporosarcina</i> sp. TR1	Göl				4,17 U/ml	
<i>Sporosarcina</i> sp. TR3	Göl	1 g/l et ekstraktı, 5 g/l pepton, 5 g/l NaCl, 2 g/l maya ekstraktı, 20 g/l üre			5,73 U/ml	
<i>Sporosarcina</i> sp. TR20	Göl	3 g/l et ekstraktı, 5 g/l pepton, 20 g/l üre	7,4	27°C	9,16 U/ml	[57]
<i>Stenotrophomonas</i> sp. TR16	Göl	1 g/l tripton, 0,5 g/l maya ekstraktı, 0,45 g/l trisin, 0,5 g/l (NH ₄) ₂ SO ₄ , 0,2 g/l glutamik asit, 1 g/l üre		-	2,86 U/ml	
<i>Sphingobacterium</i> sp. CV4	Mağara	6 g/l üre, 1 g/l nütrient çözeltisi, 0,84 g/l NaHCO ₃		-	1,92 U/ml	
<i>Bacillus</i> sp. CR2	Maden atık toprağı	Üre içeren nütrient çözeltisi, CaCl ₂	7,5	30°C	432 U/ml	[58]

Tablo 2.2 (devam) Mikroorganizmalar, orijini, çoğaltma koşulları ve üreaz aktiviteleri.

Bakteri	Bakteri orijini	Nütrient	ph	Sıcaklık	Üreaz aktivitesi	Ref.
<i>L. sphaericus</i> CH-5	Terk edilmiş otoban ve maden ocağı toprağı	BPU, 2 g/L CdCl ₂ ·5H ₂ O	-	30°C	2,49-0,11 µmol/dk	[59]
<i>B. megaterium</i> AP6	Alkali toprak	50 ml nütrient çözeltisi, 2% üre	8,4	37°C	553 U/ml	[60]
<i>Bacillus sp.</i> AP4					534 U/ml	
<i>B. simplex</i> AP9					493 U/ml	

2.1.4 Mikrobiyal kalsit çökeliminin biyokütle-enerji tesisleri ile entegrasyonunun avantajları

Günümüzde küreselleşme ile birlikte ülkelerin üç ana problemi bulunmaktadır. Bunlar; (i) dünya nüfusunun ve enerji ihtiyacının artışından kaynaklı fosil enerji kaynaklarının azalması, (ii) atmosferdeki karbondioksit konsantrasyonunun artışından kaynaklı küresel ısınma ve (iii) nüfus artışından kaynaklı katı/sıvı atıkların artışı olarak sayılabilir [63].

Artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek adına, fosil yakıt kaynakları hızla kullanılmakta ve alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç giderek artmaktadır [61]. Gelecekte gerçekleşebilecek bir enerji krizini önleyebilmek adına alternatif kaynaklara yönelmek oldukça önemlidir [62].

Evsel atık miktarı ise küresel ölçekte özellikle şehirleşme ve popülasyon artışı ile giderek daha da önemli bir problem haline gelmektedir [70]. Türkiye'nin en önemli çevresel ve ekonomik problemlerinin başında da belediyeler ile diğer yerlerden kaynaklanan atıkların miktarının artışı ve bu atıkların bertarafı gelmektedir [71].

Atıktan enerji üretimi küresel ölçekteki iki önemli sorun olan atık yönetimi ve sürdürülebilir enerji üretimi problemlerine aynı anda çözüm üretilebilmesi açısından önem taşır. Bu süreç bir yandan düzenli depolamaya gönderilen katı atıkların düzenli depolama esnasındaki arazi kullanımı, enerji tüketimi, sızıntı suyu arıtımı sorunlarına bir çözüm yolu oluştururken bir yandan da dünyanın her geçen gün artan enerji ihtiyacına sürdürülebilir ve alternatif bir çözüm sunar. Bu

durum aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve döngüsel bir ekonominin oluşturulması yolunda bir strateji de ortaya koyar.

Atıktan-enerji-üretimi ile hem küresel enerji problemine hem de atık bertarafı sorununa aynı anda çözüm getirilebileceği ortadadır, ancak diğer yenilenebilir enerji üretimi seçenekleri olan rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi gibi enerji üretimi aşamasında emisyon oluşturmayan yöntemlere kıyasla önemli bir dezavantaj da barındırmaktadır. Atıktan enerji üretimindeki bu dezavantaj, biyokütlelen oluşumunda yapısına bağlanmış olan karbonun biyokimyasal veya fizikokimyasal yollarla yeniden atmosfere salınımına neden olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla atıktan enerji üretiminde, diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile kıyasla, emisyon açısından daha dezavantajlı bir görünüm ortaya çıkmaktadır.

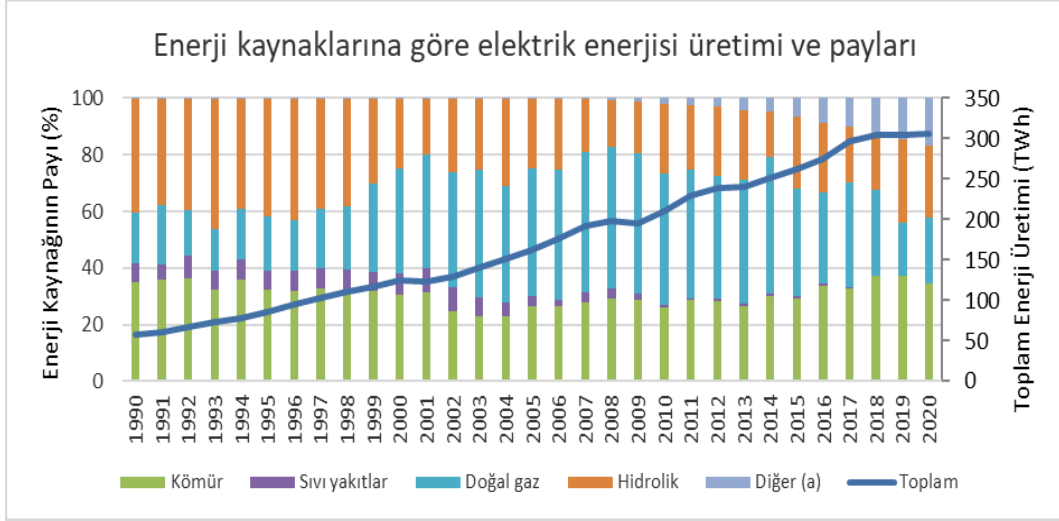
Mikrobiyal kalsit çökelişi ile karbondioksitin kaynağında tutulmasının atıktan enerji üretimi yapan tesislere entegrasyonu ile küreselleşmenin üç ana problemi olan enerji, karbon emisyonu ve atık yönetimine bütüncül bir çözüm yolu ortaya konulabilecektir. Dolayısıyla MKÇ'nin bu alandaki uygulama potansiyeli bu tez çalışması kapsamında ana odak noktası olarak seçilmiştir. MKÇ'nin birçok farklı alanda da uygulama potansiyeli mevcuttur. Tezin odak noktası dışında kalan diğer MKÇ uygulama alanları Bölüm 6.3'da detaylı olarak anlatılmaktadır.

2.2 Yiyecek Atıklarından Enerji Üretimi

Küresel enerji ihtiyacının %80'inden fazlasını karşılayan fosil yakıtlar en güvenilir enerji kaynaklarından biridir [64], [65]. Özellikle nüfus artışı ile artan enerji ihtiyacı ve konvansiyonel enerji kaynaklarının tükenmeye başlaması alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır [66], [67]. Fosil yakıt kaynaklı enerji üretimi hava kirlenmesi ve küresel ısınma başta olmak üzere birçok çevresel soruna yol açar [68], [69]. Enerji sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltma arayışı yenilenebilir kaynaklara olan yönelimi artırmıştır [66]. Bilindiği üzere sürdürülebilir kalkınmanın en önemli adımı da temiz ve ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaktan geçmektedir [63].

Devletin 2023 yılına kadar “ülkenin enerji ihtiyacının %30'unun yenilenebilir enerjilerden karşılanması” vizyonunun da katkısı ile özellikle son yıllarda Türkiye'deki atıktan enerji üretimi teknolojilerinin uygulanmasında hızlanma

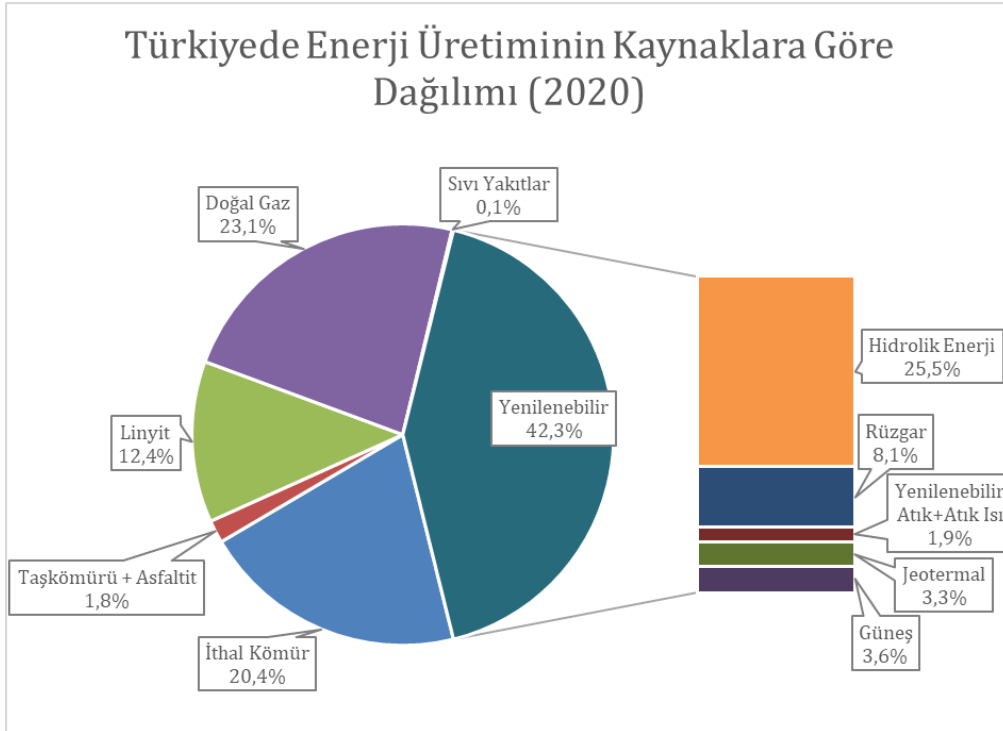
gerçekleşmiştir [71]. TÜİK verilerine göre (Şekil 2.5), 306.703 GW.sa'lık 2020 yılı toplam enerji üretiminin %42,3'ünü yenilenebilir enerji kaynakları ve atıklar oluşturmaktadır [76].



Şekil 2.5 Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ve payları; (a)

Jeotermal, rüzgâr, katı biyokütle, güneş, biyogaz ve atık kaynakları [76].

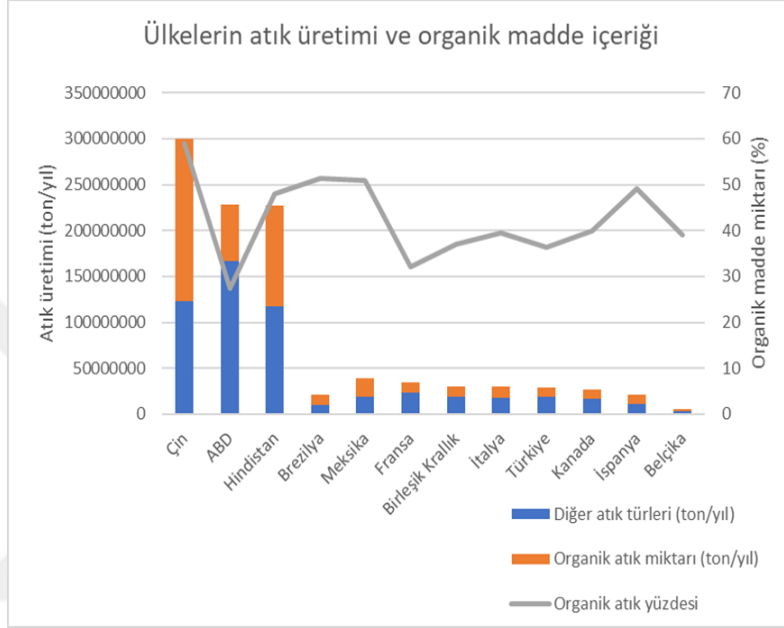
2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından, hidrolik, rüzgâr, güneş, biyokütle, jeotermal ve atık ısının Türkiye'nin enerji üretiminin %42'sine erişilmesi sayesinde %30 hedefine ulaşılmış bulunmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 2020 yılı enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı [77].

Türkiye’de 2010 yılında yürürlüğe giren “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” kapsamında 2025 yılı sonuna kadar biyobozunur atıkların, düzenli depolama tesislerindeki toplam atığın %35’ine indirilmesi planlanmaktadır [75].

Ülkelere göre atık üretiminin değişimi ve organik atık yüzdeleri Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Yıllık atık üretiminin ülkelere göre dağılımı ve organik madde miktarının değişimi [74].

Atık yönetimi stratejileri (Şekil 2.8) sırasıyla; atıkların kaynağında azaltılması, tekrar kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve düzenli depolama olarak en çok tercih edilenden en az tercih edilene olmak üzere sıralanabilmektedir [66].



Şekil 2.8 Atık yönetimi hiyerarşisi [67].

Yapılan araştırmalara göre; geri dönüşüm yapan ülkelerde atıktan enerji üretimi çalışmaları daha fazlayken, gelişmekte olan ülkelerde ise düzenli depolama uygulamaları fazla olup enerji geri kazanımı arka planda kalmaktadır [72]. Ayrıca bertarafı yapılan atık içerisindeki organik atık yüzdesi; düşük gelir grubundaki ülkelerde %64, orta gelir grubundaki ülkelerde %56 ve yüksek gelir grubundaki ülkelerde %28'dir [73].

Düzenli depolama teknikleri her yıl yaklaşık 25 milyon ton evsel atık üretilen ülkemizde, evsel atıktan enerji üretmekte kullanılan yöntemlerden biridir [71]. Atıktan enerji üretimi, enerji ihtiya ını karşılamak adına potansiyel alternatif kaynaklardan biri olarak değerlendirilmekle birlikte ekonomik olarak uygulanabilir ve çevresel olarak sürdürülebilir bir özellik taşır [61]. Ayrıca atık yönetimine etkin, ekonomik ve çevreci uygulamalar ile destek olmak Avrupa Birliği Mevzuatlarına uyumu da sağlayacak olup ülkemiz açısından uzun dönemde faydalı olacaktır [71].

Enerji kaynağı olarak tarımsal, endüstriyel ve evsel kaynaklı çeşitli atıklar kullanılması hem enerji üretiminde sürdürülebilir kaynaklar sağlaması açısından hem de atıktan enerji üretimi yoluna geçiş açısından önemlidir [63]. Enerji potansiyeli yüksek olan evsel atıkların enerji üretiminde kullanılmasının desteklenmesi ülkelere sürdürülebilir enerji üretimi açısından fayda sağlayacaktır [71]. Ayrıca son yıllarda yiyecek atıkları enerji üretimi açısından da önemli bir kaynak olarak görülmeye başlanmıştır [78].

şehirleşme hızının artışı, endüstriyelleşme ve popülasyon artışı sebebiyle dünya genelinde üretilen atık miktarının 2050 yılına kadar 9,5 milyar tona ulaşması beklenmektedir [79]. IPCC 2006 yılı raporuna göre evsel atığın %25-70 gibi bir yüzdesini yiyecek atıkları oluştırmaktadır [80]. Yiyecek atıkları, üretim (tarım, işleme ve dağıtım) ve tüketim (yiyecek hazırlama ve tüketim fazlası) gibi farklı aşamalarda oluşmakla birlikte, taze sebze, meyve, et, unlu mamuller ve süt ürünleri başta olmak üzere her yıl yaklaşık 1,3 milyar ton yiyecek tedarik zincirinde kaybolmaktadır [81], [82], [83].

Yiyecek atıkları, hayvan yemi veya kompost olarak geri dönüştürülmekte, geri dönüşümü sağlanamayan yiyecek atıkları ise ya yakılmakta ya da düzenli depolama sahalarına gönderilmektedir [84]. Yakılma veya düzenli depolama

durumunda CO₂ veya CO₂'den 23 kez daha güçlü bir sera gazı olan CH₄ oluşmaktadır [78].

Karışık yiyecek atıklarının nem miktarı %60-86, toplam katı madde miktarı %14-39, uçucu katı madde miktarı %87-98 ve kül miktarı %1-11,5 [83] arasında değişmektedir.

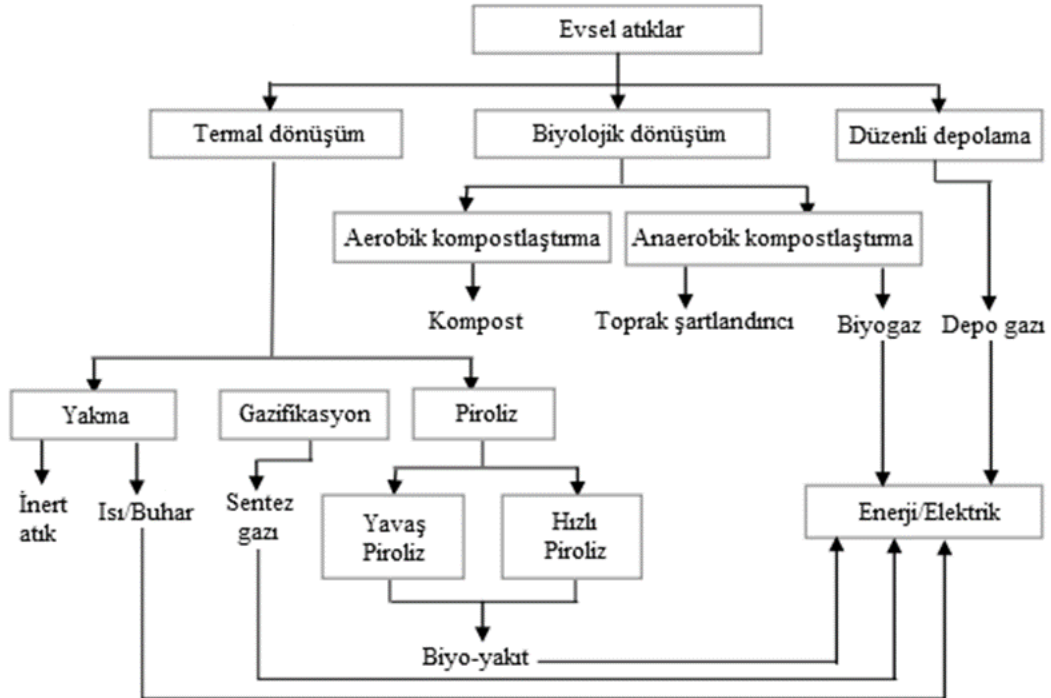
2.2.1 Atıktan enerji üretim stratejileri

Atıkların enerji üretiminde kullanılabilmesi için en optimal stratejiyi bulmak en güncel ve önemli problemlerin başında gelmektedir [66].

Atıktan enerji üretimi teknolojileri üç ana kategoride (Şekil 2.9) incelenmektedir [71];

- i) Termal dönüşüm yöntemler (yakma, piroliz ve gazifikasyon),
- ii) Biyokimyasal dönüşüm,
- iii) Düzenli depolama

Atıktan enerji üretimini doğrudan enerji üretimi ve sonradan kullanmak üzere yakıt üretimi olarak da iki kategoride incelemek de mümkündür [85].



Şekil 2.9 Evsel atıklardan enerji/yakıt üretim stratejileri ve ürünleri [61].

Farklı enerji üretim yöntemlerinin birbirleriyle kıyaslanabilmesi açısından ilk yatırım ve işletme maliyetleri ile küresel ısınma potansiyelleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Atıktan enerji üretimi stratejilerinin maliyet ve çevresel etkileri [61].

Atıktan Enerji Üretim Teknikleri	İlk Yatırım Maliyeti (Dolar /ton atık/yıl)	İşletme Maliyeti (Dolar /ton atık/yıl)	Küresel Isınma Potansiyeli (kg CO ₂ /MW saat enerji üretimi)
Piroliz	400-700	50-80	412
Gazifikasyon	250-850	45-85	412
Anaerobik çürütme	50-350	5-35	222
Depo gazı üretimi	10-30	1-3	746
Yakma	400-700	40-70	424

Atıkların enerji amaçlı kullanımının yaygınlaşması yalnızca ülkelerin enerji ihtiyacı doğrultusunda artış gösteren konvansiyonel enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltmayacak aynı zamanda da evsel atık yönetimi problemine de bir çözüm getirecektir [61].

Yakıt amaçlı kullanımı gerçekleşen biyokütlelerin fizikokimyasal özellikleri literatürde Tablo 2.4'teki gibi verilmektedir.

Tablo 2.4 Biyokütlelerin fizikokimyasal ve yakıt özellikleri [91], [92].

Özellik	Değer
Yakıt yoğunluğu (kg/m ³)	Yaklaşık 500
Partikül büyüklüğü (mm)	Yaklaşık 3
C içeriği (% kuru ağırlık)	42-54
O içeriği (% kuru ağırlık)	35-45
S içeriği (% kuru ağırlık)	En fazla 0,5
Kuru ısı değeri (MJ/kg)	14-21

2.2.1.1 Yakma

Yakma endüstride enerji eldesinde en fazla tercih edilen yöntem olmakla birlikte karbon içerikli maddelerin yakılmasının yüksek oranda karbondioksit salınımına neden olduğu da bilinmektedir [86], [87], [88], [89]. Endüstride kömür kullanımının yanında biyokütlenin de yakıt amaçlı kullanımı yaygınlaşmaya başlamış ve bu sayede sadece kömür ile enerji eldesine kıyasla biyokütle ilavesi ile karışık kullanılması toplam karbon emisyonlarının azaltılmasına destek olmuştur [89].

Biyokütlenin yüksek nem ve yüksek oksijen içerikli yapıya sahip olmasından ötürü ısı değeri düşük olması söz konusu olmaktadır [90]. Özellikle nemin varlığının biyokütlenin ısı değerini düşürmesi nedeniyle kurutma öğütme gibi ön

işlemlerin uygulanması gerekmektedir. Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesi hususunda birden fazla yakma tekniği, reaktör türü ve yöntem bulunmakla birlikte bunlar arasından en yaygın olanları; sabit-yataklı yakma sistemleri ve akışkan yataklı yakma sistemleri olarak sayılabilir [90].

2.2.1.2 Piroliz

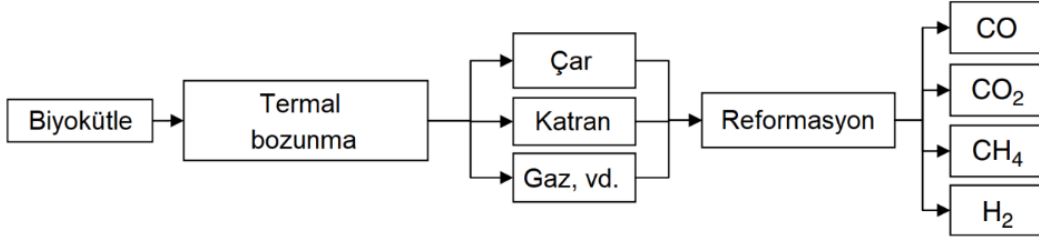
Piroliz maddenin yakıtı veya enerjiye termal yollarla dönüşüm sürecidir. Piroliz yoluyla yiyecek atıkları oksijensiz ortamda biyo-yag, piroliz gazı ve katı biyoçara dönüştürülebilmektedir [78]. Piroliz genellikle 400 ile 800°C arasında gerçekleştirilen bir proses olup, 700 derecenin üzerindeki sıcaklıklarda ana ürün olarak piroliz gazı daha yoğun olarak açığa çıkarken, daha düşük sıcaklıklarda piroliz gazı miktarı düşük, piroliz yağı daha fazla oluşur [61]. Piroliz yağı bir çeşit katran olup hidrokarbon içerirken, çar ise uçucu olmayan atık kalıntısından meydana gelir [93]. Pirolizden elde edilen katran benzeri sıvı ürün, yüksek viskoziteye sahiptir ve koyu kahverengidir. İçerisinde asetik asit ve formik asit de bulundurmasından ötürü pH'ı 3 civarındadır [94]. Açığa çıkan gazın içeriği; CH₄, H₂, H₂O, CO, CO₂, bazı inert gazlar, iz miktarda yüksek hidrokarbonlar (C₂H₄, C₂H₆) ve küllerden meydana gelmektedir [71]. Yiyecek atıklarının pirolizinde ise %85 oranında CO ve H₂ gazının yanında az miktarda CO₂ ve CH₄ açığa çıktığı tespit edilmiştir [78]. Evsel atıkların pirolizi sonucunda açığa çıkan piroliz gazının gaz türbinlerinde enerjiye dönüştürülmesi esnasında net enerji dönüşüm verimi %29 civarındadır [61]. Biyokütlenin sıvı, gaz ve çar dönüşümünü temsil eden eşitlik Denklem 2.10'da verilmiştir [95].

$$C_nH_mO_p(\text{Biyokütle}) \xrightarrow{Ist} \sum_{sıvı} C_xH_yO_z + \sum_{gaz} C_aH_bO_c + H_2O + C(\text{çar}) \quad (2.10)$$

2.2.1.3 Gazifikasyon

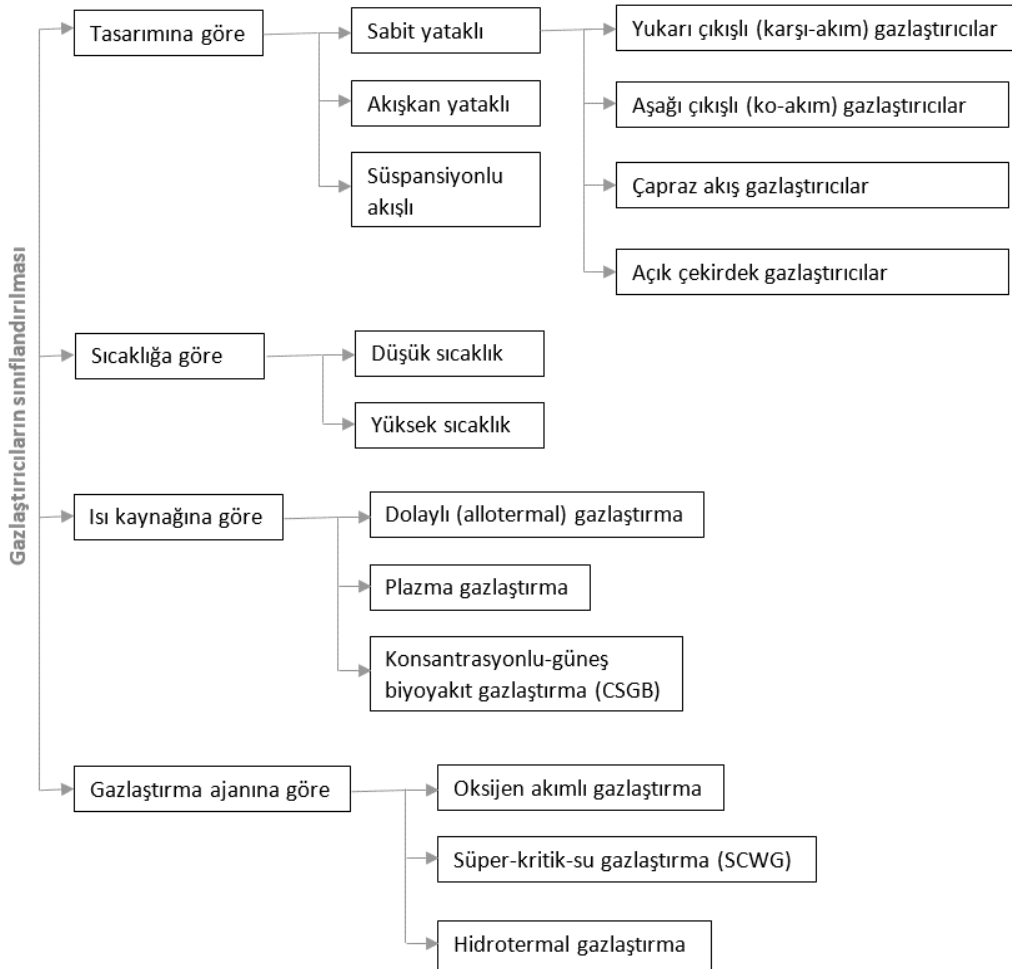
Gazifikasyon bir termal dönüşüm prosesi olup, organik yapıdaki bileşiklerin kontrollü atmosferde ve yüksek sıcaklıkta sentez gazına dönüştürülmesini sağlar. Şekil 2.10'da gazifikasyon prosesine ait reaksiyon adımları yer almaktadır. Gazifikasyon prosesinde sıcaklık 800-1600°C arasında değişmekte olup, kontrollü oksijen beslemesi ile kısmi oksidasyon gerçekleştirilir [61]. Yiyecek atıklarının pirolizinde proses sıcaklığı genellikle 800-900°C civarında değişmektedir [96]. Gazifikasyon esnasında hidrojen zengin sentez gazı açığa çıkar [97], [98], [99]. Piroliz esnasında CO₂, CH₄, NH₃, HCN, CO, H₂ gibi yanıcı, patlayıcı, zehirli veya

küresel ısınma potansiyeli olan gazlar açığa çıkmaktadır [78]. Reaktör tasarımına ve işletim koşullarına bağlı olarak sentez gazının içeriğinde yüksek hidrokarbonlar da bulunabilmektedir [71]. Elde edilen ürünlerin kalitesi genellikle beslenen oksijen gazının saflığı ile ilişkilidir [67].



Şekil 2.10 Gazifikasyon adımları [95].

Gazlaştırıcılar tasarıma, işletim sıcaklığına, ısı kaynağına ve gazlaştırma ajanına bağlı olarak farklı şekillerde isimlendirilebilir. Bu isimlendirmeler Şekil 2.11’de verilmiştir.



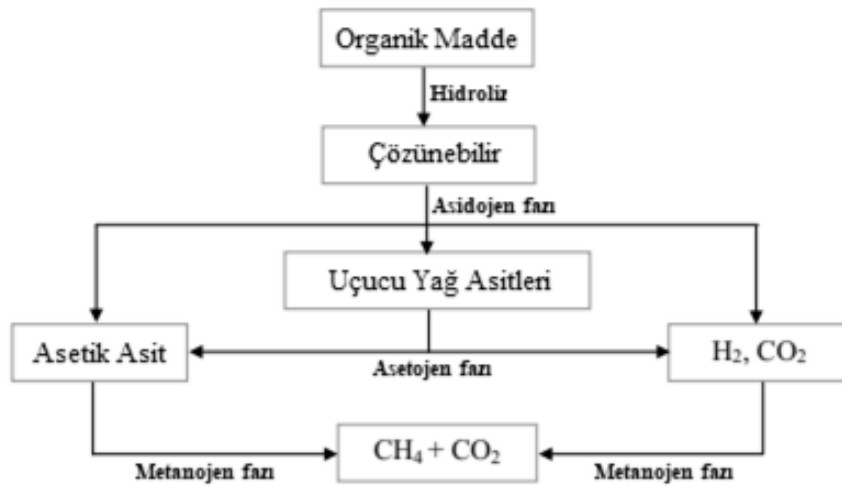
Şekil 2.11 Gazlaştırıcıların sınıflandırılması ([90]’daki bilgilere uygun olarak oluşturulmuştur).

Islak biyokütle ve organik atıkların gazlaştırılması için en uygun teknolojilerin başında süper-kritik-su gazlaştırması gelmektedir. Bu yöntem yiyecek atıklarının gazlaştırma öncesi kurutulma ihtiyacını ortadan kaldırarak suyu bir reaksiyon medyası olarak kullanır [100]. Süper-kritik-su organik maddelerinkine benzer düşük dielektrik sabitine sahiptir ve bu sayede daha yüksek verimde, daha homojen bir reaksiyon gerçekleşirken gaz oluşum verimi artar [90].

2.2.1.4 Biyometanizasyon

Biyometanizasyonun yenilenebilir enerji üretimi, nütrient geri kazanım ve depolanan atık miktarının azaltılması gibi çeşitli faydaları bulunmaktadır [101]. Biyometanizasyon ile oksijensiz ortamda organik biyobozunur nitelikteki atıktan biyogaz eldesi mümkündür [61]. Biyometanizasyon ile üretilen biyogaz yaklaşık olarak 25–50% CO₂, 50– 75% CH₄ ve 1–15% diğer gazlardan (su buharı, H₂S, NH₃ gibi) meydana gelmektedir [102]. Üretilen 1 m³ biyogaz ile yaklaşık 21 MJ enerji üretilebilmektedir, ki bu da %35 verimliliğe sahip bir enerji üretim tesisinde 2,04 kW saat elektriğe karşılık gelmektedir [103].

Organik ve biyobozunur nitelikte olan atıklar biyometanizasyon ile metana dönüşürken (Şekil 2.12) sırasıyla; hidroliz (kompleks organiklerin daha basit yapıdaki çözünebilir organik maddelere dönüşümü), fermantasyon (organik moleküllerin asetik asit, H₂ ve CO₂'ye dönüşümü) ve metanojen fazı (metan oluşumunun gerçekleştiği basamak) aşamalarından geçerler [61].



Şekil 2.12 Biyometanizasyon adımları [61].

Biyometanizasyon ile %60 organik madde ve %40 nem muhtevasına sahip 1 ton evsel atıktan 150 kg metan üretilebilmektedir [104]. Biyometanizasyon mezofilik (20-35 °C, 15-30 gün bekleme süresi) veya termofilik (55 °C, 12-14 gün bekleme süresi) koşullarda gerçekleştirilebilmektedir [63].

Yapılan çalışmalar, biyogaz üretiminin yalnızca düşük maliyetli ve çevre dostu olmakla kalmayıp aynı zamanda patojenlerin azaltılması ve yan ürün olarak organik gübre oluşturulması açısından da faydalı olduğunu ortaya koymuştur [67].

2.2.1.5 Atıktan enerji üretim proseslerinde kullanılan ön işlemler

Evsel atıklardan enerji üretimi sürecinde atığın nem miktarı nedeniyle ısı değeri 5 ile 20 MJ/kg arasında değişim göstermekte olup, Uluslararası Enerji Ajansı'na göre verimli bir enerji dönüşümünün sağlanabilmesi için kalorifik değeri 8-12 MJ/kg aralığında olmalıdır [71]. Aynı zamanda verimin artırılması adına temas yüzeyinin artırılması gerekmektedir. Tüm bu nedenlerle atıklara enerji üretimi prosesinden önce öğütme, susuzlaştırma vb. çeşitli ön işlem uygulamaları yapılması gerekir. Bazı biyokütlelere ait nem oranları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 Farklı atıkların nem yüzdeleri [95], [107].

Atık türü	Nem Yüzdesi (%)
Karışık yiyecek atığı	38-70
Mısır sapı	40-60
Buğday samanı	8-20
Pirinç samanı	50-80
Pirinç kabuğu	7-10
Süt ineği gübresi	88
Ağaç kabuğu	30-60
Talaş	25-55

Pirolizde nem oranının %10'dan küçük olması istenir [105]. Gazifikasyonda ise bu oranın %15-20'den yüksek olmaması ve homojen parçacık yapısı istenmektedir [106]. Özellikle gazifikasyonda kilogram nem miktarı başına suyu gazifikatörde buharlaştırabilmek için fazladan 2260 kJ enerji harcanması gerekmektedir [95]. Ancak süper-kritik-su gazifikasyonunun kullanımı ile bu enerji ihtiyacından kurtulmak mümkündür.

2.3 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

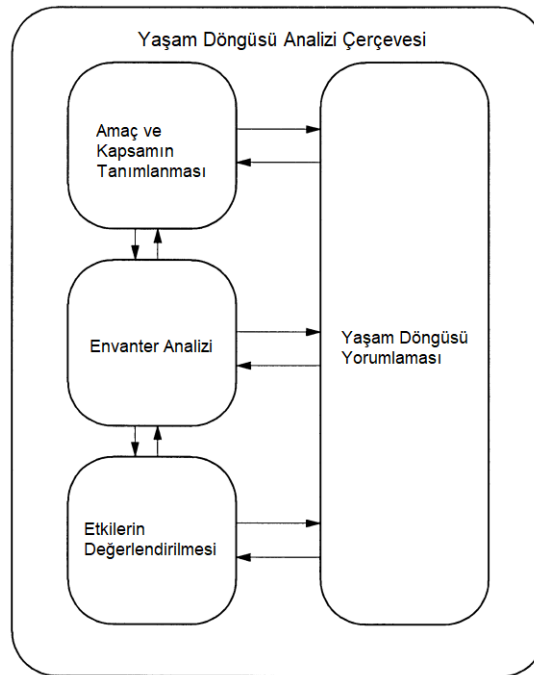
Sürdürülebilir evsel atıkların yönetiminde sadece çevresel koşullar değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik koşulların incelenmesi gerekmektedir. Sürdürülebilirliği etkileyen etmenler atıkların bertarafının yanı sıra, hava/su/toprak kirliliği, enerji ve malzeme geri kazanımıdır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD; LCA: Life Cycle Analysis) bir ürünün veya sistemin ömrünün çevresel etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla bu ürünü veya sistemi etkileyen tüm faktörlerin de dikkate alınması suretiyle gerçekleştirilen metodolojik bir sistemdir [108].

Bu analizin gerçekleştirilmesi etkin ve ekonomik entegre sistemin ortaya konulması için önemlidir.

Bir Yaşam döngüsü değerlendirmesinde 4 ana basamak bulunmaktadır ve bunlar sırasıyla aşağıdaki gibi belirlenmiştir [109];

- Amaç ve kapsamın tanımlanması,
- Envanter analizinin gerçekleştirilmesi,
- Etkilerin değerlendirilmesi,
- Yaşam döngüsü yorumlaması

Yaşam döngüsü değerlendirmesindeki basamakların ilerleme sırası ve birbiriyle ilişkisi Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Çerçevesi [109].

2.3.1 Amaç ve kapsamın tanımlanması

Yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılırken başlangıç aşamasında amaç ve kapsamın doğru ve açık bir şekilde tanımlanması önemli bir yer tutar.

Amaç tanımlanırken; yapılması planlanan çalışma, çalışmanın gerçekleştirilme nedeni, hedef kitle (çalışma sonuçlarıyla doğrudan ya da dolaylı yoldan ilişkili olacak kişiler ya da gruplar), çalışma sonucunda elde edilen sonuçların halka açık olup olmayacağı, gibi bilgilerin detaylı bir şekilde verilmesi önemlidir [110].

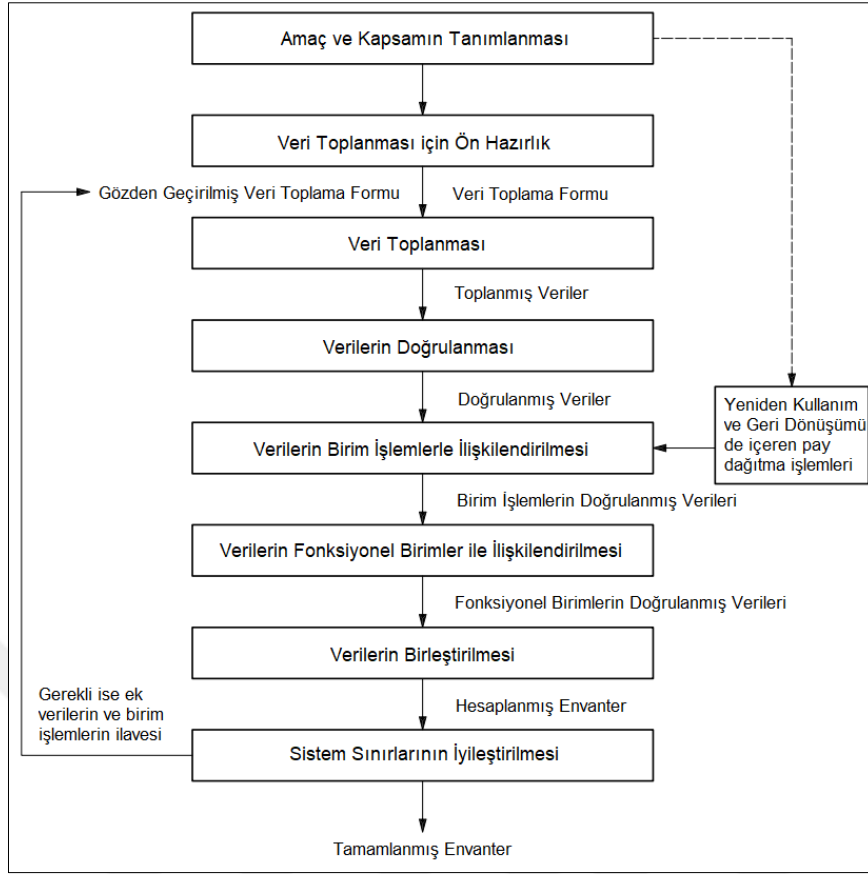
Çalışmanın kapsamı oluşturulurken ise net bir şekilde; ürün sistemi, ürün sistemlerinin formülleri, fonksiyonel birimler, sistem sınırları, pay dağıtma işlemleri, yaşam döngüsü etki analizi metodolojileri, yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılacak etki kategorileri, yaşam döngüsü yorumlaması için kullanılacak yöntemler, veri gereksinimleri, varsayımlar, değer seçenekleri, kısıtlar, veri kalitesi gereksinimleri, gerekli ise eleştirel incelemenin türü, ve çalışma için gerek duyulan rapor formatının belirlenmesi gereklidir [110, s. 140].

Amaç ve kapsam, yaşam döngüsünün herhangi bir aşamasında gerek görülmesi durumunda küçük düzeltmeler ve değişikliklere tabi tutulabilir.

2.3.2 Envanter analizinin gerçekleştirilmesi

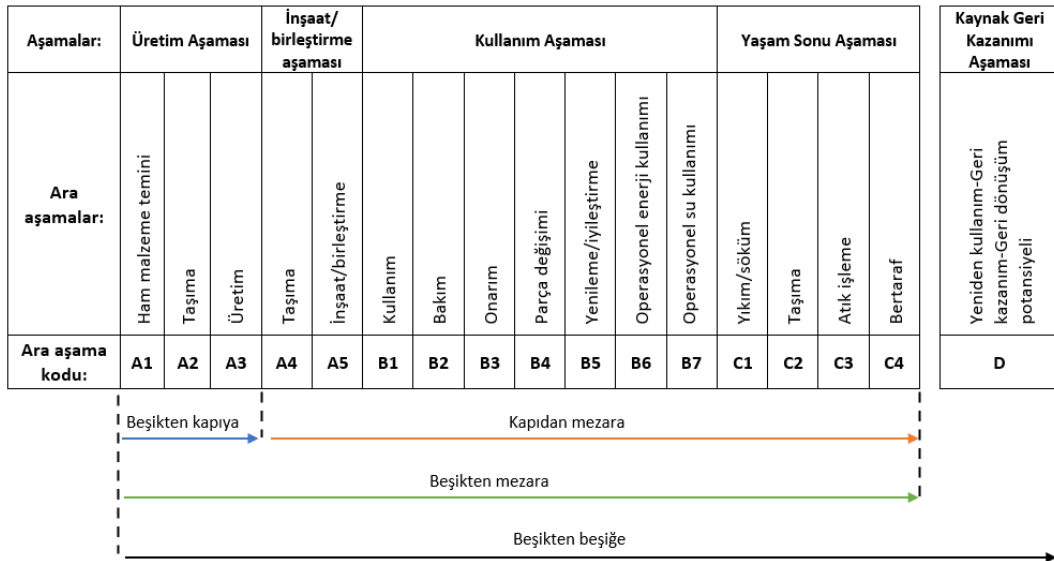
Envanter analizi için sistem sınırları içerisinde kalan her birim işlemi için nitelik ve niceliksel olarak veriler toplanır. Ölçüm, hesaplama veya tahmin olarak toplanan tüm veriler birim işlemlerin girdilerini veya çıktılarını oluşturur. Toplanan her verinin; referansları, elde edilme tarihleri ve diğer önemli bilgileri ile birlikte kaydedilmesi önemlidir. Gerekli görüldüğü durumlarda proses akış semaları, veri toplama yöntemleri, hesaplama teknikleri, akışlar ve bunlarla ilişkili olan verilerin belirtilmesi gerekebilir [110].

Envanter analizi, Yaşam döngüsü değerlendirmesinin en önemli aşaması olup, bu aşamanın dikkatle ve detaylı bir şekilde yürütülmesi sonuçların doğruluğunu doğrudan etkiler. Envanter analizi yapılırken takip edilmesi gereken işlem basamakları Şekil 2.14'te detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 2.14 Envanter Analizi Akış Şeması [110].

Verilerin toplanması aşamasında proses akışının net olarak tanımlanması önem taşımaktadır. Proses akışı belirlenirken Şekil 2.15'te verildiği gibi her bir alt prosese bir kod verilebilir.



Şekil 2.15 Envanter Analizi Proses Aşamaları Örnek Sınıflama Sistemi ([111]'deki binaların LCA'sına ait tablodan uyarlanarak geliştirilmiştir).

Bu yöntem Yaşam Döngüsü Envanter Analizini kolaylaştırabilir. Proses akışının belirlenmesinden sonra ise, her aşamada tüketilen ve üretilen enerji, ısı, kimyasal, su gibi verilerin sayısal değerleri ile bunlara ait birimlerin doğru bir şekilde not alınması gerekmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmesinde en çok yapılan hatalar birimler konusunda gerçekleşmekte, bu durum ise analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir.

2.3.3 Etkilerin değerlendirilmesi

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde, etkilerin değerlendirilmesi işlem basamağı sayesinde bir ürünün veya bir sürecin olası çevresel etkilerinin önemi ve büyüklüğü nicelik bakımından ortaya konulur.

Etkilerin değerlendirilmesi aşamasında; değerlendirilecek etki kategorilerinin belirlenmesi, karakterizasyon modellerinin seçimi, sonuçların sınıflandırılması ve kategori indikatör sonuçlarının hesaplanması zorunlu işlem basamaklarıdır [110]. Bu aşama en az envanter analizi kadar önemlidir. Değerlendirme aşamasında hata yapılması durumunda raporlama aşamasında çevresel etkisi büyük bir prosesin çevresel etkisi küçük ya da benzer bir şekilde etkisi çok az bir prosesin etkisi fazla gibi bir yanılgıya neden olabilir.

2.3.4 Yaşam döngüsü yorumlaması

Yaşam döngüsü yorumlamasında;

- İlk 3 aşama ile belirlenen sonuçlardaki önemli durumların belirlenmesi,
- Sonuçların bütünlük, hassaslık ve tutarlılık bakımlarından incelenmesi,
- Çıkarımların, çalışmayı sınırlandıran hususların ve önerilerin belirtilmesi

işlem basamaklarının gerçekleştirilmesi gereklidir [110].

Daha önce de bahsedildiği üzere yaşam döngüsü yorumlaması basamağında uygun görülmesi durumunda önceki işlem basamaklarında değişiklikler yapılabilir, bu basamaklar yeniden çalıştırılabilir/hesaplanabilir. Yaşam döngüsü değerlendirmesinin tüm basamakları birbiri ile uyum içerisinde ve birbirini destekleyici nitelikte olmalıdır.

3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Bakteri Numunelerinin Alınması, Zenginleştirilmesi ve Analizleri

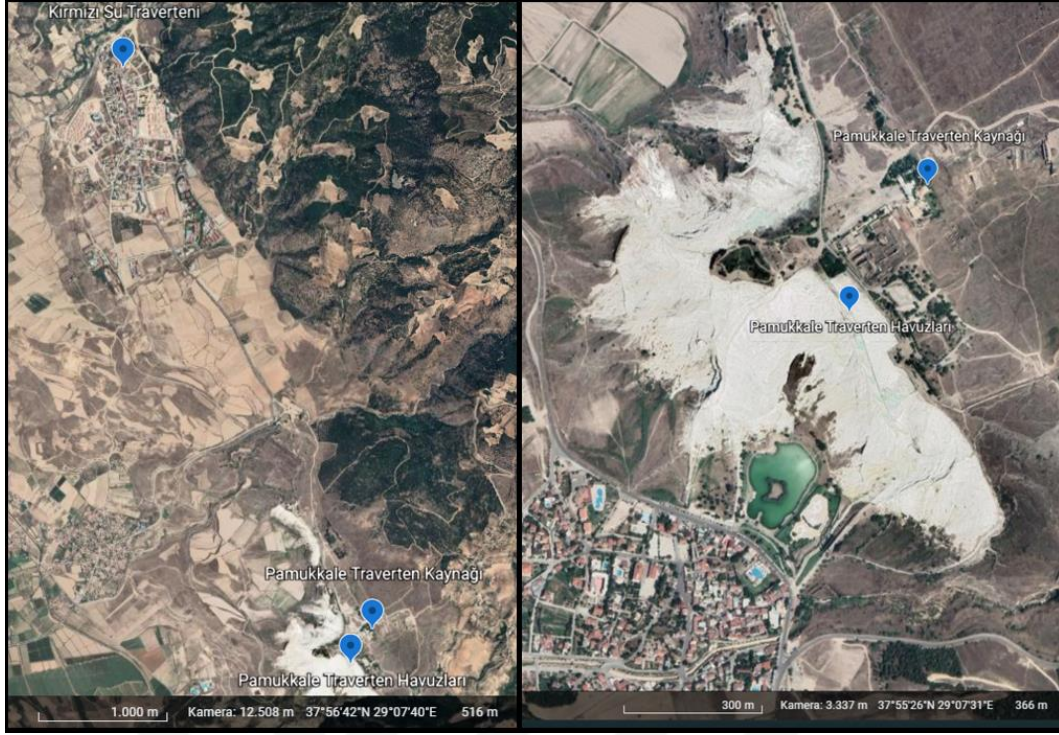
3.1.1 Numunelerin alınması

Aseptik şartlarda 1L'lik polietilen şişelere her bir su kaynağından 3'er su numunesi (yani toplamda 9 adet numune) alınmıştır ve analizleri yapılana dek +4°C sıcaklığında saklanmıştır. Numune alımı esnasında (Şekil 3.1) doğal su ortamının sıcaklığı da ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 3.1 Numune alımı esnasında çekilmiş, Su Kaynaklarına ait görüntüler (Soldan sağa doğru sırasıyla; Traverten Kaynağı, Traverten Havuzları ve Kırmızı Su)

Numune alınan noktaların uydu görüntüleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Travertenlerin kaynak suyunun çıktığı nokta Pamukkale travertenlerinin kuzeydoğusunda bulunmakta olup, sırasıyla önce tarihi havuzlara, ardından da kalsiyum karbonat çökmesiyle bilinen traverten havuzlarına akmaktadır. Üçüncü numune noktası olan Kırmızı su traverteni ise (diğer adıyla Karahayıt-Kırmızı Su) Pamukkale travertenlerinin yaklaşık dört kilometre kuzeybatısında yer almaktadır.



Şekil 3.2 Numune noktalarının uydu konumları

3.1.2 Bakterilerin zenginleştirilmesi

Her kaynaktan toplanan 3'er numune kaynak başına 1'er numuneye düşecek şekilde homojenize edilmiş ve böylece 3 kaynağa ait 1'er numune (yani toplamda 3 adet numune) ile mikrobiyal çalışmalara devam edilmiştir. Bu numuneler 3 farklı çoğaltma medyası (Tablo 3.1) içerisine aşılansarak (%10, v/v) 150 rpm'de 28°C sıcaklıkta aerobik koşullar altında inkübe edilmiştir.

Tablo 3.1 Zenginleştirme medyaları ve içerikleri [112].

Medya	İçeriği
Nütrientli çoğaltma medyası (NB)	3 g/L et ekstaktı, 5 g/L pepton, 20 g/L üre, 0.1 g/L nikel(II) klorür.
Nütrientli çoğaltma medyası no 3 (NB3)	1 g/L et ekstraktı, 5 g/L pepton, 5 g/L NaCl, 2 g/L maya ekstraktı, 20 g/L üre, 0.1 g/L nikel(II) klorür
ATCC 1832 çoğaltma medyası (ATCC1832)	10 g/L tripton, 5 g/L maya ekstaktı, 4.5 g/L trisin, 5 g/L (NH ₄) ₂ SO ₄ , 2 g/L glutamik asit, 10 g/L üre, 0.1 g/L nikel(II) klorür.

3.1.3 Üreaz enziminin tespiti

Zenginleştirmeden sonra farklı kaynak ve çoğaltma medyaları üzerinde Stuart medyası kullanılarak üreaz aktivitesi varlığı tespiti yapılmıştır. Stuart Üre medyasının içeriği şu şekildedir; 0,1 g/L maya ekstraktı, 9,1 g/L KH_2PO_4 , 9,5 g/L K_2HPO_4 , 20 g/L Üre, 0,01 g/L Fenol Kırmızısı (Fenol sülfotalein).

Medya hazırlandıktan sonra 0,45 μm 'lik filtre ile strelize edilir ve kullanılabilecek kadar +4°C sıcaklıkta muhafaza edilir. Ürenin bozunmasına engel olmak adına medya daha sonrasında ısıtma işlemine tabi tutulmaz. Stuart Üre medyası kullanılırken steril bir deney tüpüne 3 ml hazırlanan numuneden eklenir ve 24 saat zenginleştirilmiş bakterilerden aşılır. Tüpler kapakları aralık bırakılarak 35°C sıcaklıkta 48 saate kadar inkübe edilir. 8-48 saat aralığında numunelerde renk değişimi gerçekleştiği durumda pozitif üreaz aktivitesinin varlığı tespit edilmiş olur. Kontrol amaçlı olarak üre içermeyen Stuart medyasında aynı aşılama ile test eş zamanlı olarak tekrarlanır. Stuart Üre Medyası testleri pH değişimine bağlı bir test olup pH'ın 8,2'nin üzerine çıktığı durumda pozitif sonuç vermektedir. Bu test ile ilk 48 saat içerisindeki üreaz aktivitesi varlığı tespit edilebilmekte olup üreaz aktivitesinin miktarı ölçülememektedir.

3.1.4 Bakterilerin besiyerlerinde çoğalmalarının incelenmesi

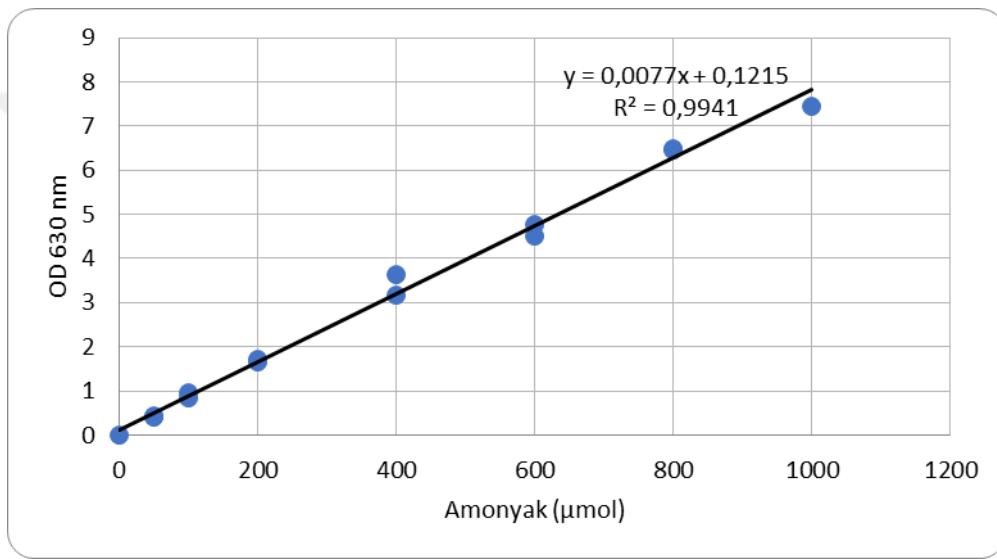
Üreaz pozitif çıkan numuneler için çoğalma kinetikleri çizdirilerek çoğalmaları incelenmiştir. Bunun için zenginleştirilen bakteriler eşit OD600 konsantrasyonunda olacak şekilde besiyerlerine aşılanmış ve 120 saat boyunca belirli aralıklar ile spektrofotometrede 600 nm dalgaboyunda optik yoğunlukları ölçülmüştür.

3.1.5 Üreaz enzim aktivitesinin tespiti

Üreaz aktivitesinin tespiti için fenol-hipoklorit test metodu kullanılmıştır [113]. Bu amaçla Amonyum klorit (50-1000 μM) standart çözelti olarak kullanılmaktadır. Kalibrasyon amacıyla kullanılmış standart çözeltilere ait görüntü Şekil 3.3'te verilmiştir. Oluşturulan kalibrasyon eğrisi ise Şekil 3.4 'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış kalibrasyon çözeltileri



Şekil 3.4 Amonyum klorit çözeltileri ile fenol-hipoklorit test metoduna göre elde edilen kalibrasyon eğrisi

Filtre edilmiş bakteri kültürü (250 μL) 0,1 M 1 mL potasyum fosfat tampon çözeltisi (pH 8) ve 2,5 mL üre (0,1 M) içerisine ilave edilir. Karışım 1'er mL fenol nitroprussit ve alkali hipoklorit ilavesinin ardından 37°C'de 5 dakika boyunca inkübe edilir. 630 nm absorbans değerine göre ürenin amonyağa hidrolizi tespit edilmektedir [49].

3.1.6 Mikrobiyal tür analizi

İzole edilmiş DNA örnekleri için amplikon dizileme kütüphaneleri, bakteriyel 16S rRNA geni V3-V4 bölgesini, arkeal 16S rRNA geni V6-V8 bölgesini hedefleyen primerler ile çoğaltılarak hazırlanmıştır. Bu kütüphaneler saflaştırılarak, miktar ölçümü yapılmış ve normalizasyon ile MiSeq (Illumina) cihazında 300bp PE kimyası ile dizileme yapılmıştır. Adaptör dizileri, bu dizileme verisinden

Çıkarılmış ve CASAVA (Illumina, USA) yazılımı vasıtasıyla okumalar barkod dizilerine göre ayrılarak analize hazır hale getirilmiştir. PCR primer dizileri QIIME2 v2021.2 programı içerisindeki cutadapt [114] eklentisi ile okumalardan çıkarılmıştır. Primer dizilerinde %100 eşleşme olmaması durumunda ise ilgili okuma analize dahil edilmemiştir. Tüm ampikon dizileme akışı QIIME2 programı ile gerçekleştirilmiştir. Çift yönlü okumalar program kullanımı ile birleştirilmiş (vsearch join-pairs), kalite filtrelemesi gerçekleştirilmiş (quality-filter q-score-joined), devamında denoising işlemi deblur (deblur denoise-16S) gerçekleştirilmiştir [115]. Elde edilen ampikon dizi varyantlarının (ASV) taksonomik sınıflandırması ‘feature-classifier classify-sklearn’ eklentisi ile daha önce eğitilmiş SILVA veritabanı verisi) ile gerçekleştirilmiştir.

3.1.7 Bakteriyel keleklerin XRD, SEM ve EDX analizleri

İnkübasyon süresi sonunda bakteriyel süspansiyonlar 3000 rpm’de 5 dakika santrifüjlenerek süpernatant uzaklaştırılmıştır. Ardından elde edilen çökelekler distile su ile 3 kez yıkanmıştır. Sonrasında 60°C’de kurutma gerçekleştirilmiş ve kuruyan çökelekler ğtlerek ince bir toz haline getirilmiştir. Toz çökeleklerin analizi, EDX donanımlı Thermo Fisher Scientific Quattro ESEM FE-SEM ve PANalytical Empyrean XRD (Cu anot 40 kV, 30 mA ve 3° ve 60° arası tarama, 2θ) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (şekil 3.5). XRD cihazı ile alınan pik verileri PANalytical Highscore Plus yazılımı kullanılarak COD (Crystallography Open Database) cretsiz veritabanında arama yapmak vasıtasıyla tespit edilmiştir.



şekil 3.5 Kullanılan SEM/EDX (solda) ve XRD (sağda) cihazları

3.2 Farklı Basınç ve Karbondioksit Oranları ile Sistemin Kurulması ve İşletilmesi

Üreaz aktivitesinin gerçekleştiği tespit edilmiş zenginleştirilmiş bakterilerden 0,5 OD600 konsantrasyonundan 1 ml alınarak 49 ml çoğaltma medyası ve 6,9 g/L CaCl_2 içeren cam serum şişesine ilave edilmiştir. Serum şişesinin ağzı kauçuk tıpa ile kapatılarak, serum şişesi boşluğuna farklı oranlarda CO_2 doldurulmuştur. Şişeler 28°C 'de 24 saat boyunca inkübe edilerek GC vasıtasıyla şişelerin gaz konsantrasyonu değişimleri tespit edilmiştir. Ayrıca şişeler inkübasyon öncesi ve sonrasında tartılarak ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Kontrol deneyleri bakteri içerecek ancak CaCl_2 içermeyecek ve bakteri içermeyecek ancak CaCl_2 içerecek şekilde iki farklı biçimde tekrarlanmıştır. Her deney 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

3.3 Bakteriyel Kum Tıkanması Deney Düzenekinin Kurulması ve İşletilmesi

Zenginleştirilen bakterilerin kum kolonunda kalsiyum karbonat üretme potansiyellerinin incelenmesi amacıyla kum kolonları kurulmuştur. Bu amaçla 60 cc'lik şırıngalar kullanılarak bunların içerisine öncelikle kumun kaçışını önlemek amacıyla whatmann filtre kâğıdı yerleştirilmiştir. Ardından otoklavlanarak sterilize edilen 0,40-0,60 mm tane boyutlu kum 50 ml çizgisine kadar doldurulmuştur. Şırıngaların alt çıkışları inkübatörde besiyerinin kaçışını engellemek adına kısıkaç ile tutturulmuştur (Şekil 3.6).

Pamukkale Traverten Kaynağı ve Pamukkale Traverten Havuzundan alınarak zenginleştirilen bakteriler eşit OD600 oranlarında şırıngalara eklenmiştir. Şırıngalara 10'ar ml ATCC1832 medyası eklenmiştir. Kontrol grubu olarak aşı ilavesiz sadece besiyeri içeren kum kolonları kullanılmıştır. Beslemeler her gün 10 ml yeni sıvı medyası ilavesi ile gerçekleştirilmiştir. İnkübasyon 28°C sıcaklıkta yapılmıştır ve 7, 14 ve 21 günlük inkübe edilmiş kum kolonları oluşturulmuştur. İnkübasyon süresinin sonunda kolonlar 2 gün boyunca 80°C 'de kurutulmuş, ardından şırıngalar sıcak bıçak vasıtasıyla kesilerek kum kolonları şırıngalardan çıkarılmıştır.



Şekil 3.6 Deney setinin kurulumu ve beslemelerde kullanılan destek ayakları (solda), inkübatöre yerleştirilen deney seti (sağda)

3.3.1 Kum kolonlarında oluşan kalsiyum karbonat miktarının tayini

Deney sonunda elde edilen kum kolonlarında oluşan kalsiyum karbonat miktarlarının tayini için EDTA titrasyon yöntemi kullanılmıştır [116]. Bu yöntem klasik bir titrasyon yöntemi olup, numunelerdeki kalsiyum karbonat konsantrasyonunun bir standart etilendiaminetetraasetik asit (EDTA) vasıtasıyla belirlenmesi prensibine dayanır. Bu amaçla inkübasyon sonunda elde edilen kum kolonlarından 5 gram kuru ağırlık tartılmış ve 10 ml 1M HCl ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışım deiyonize su ilavesi ile 100 ml'ye tamamlanarak, Erichrome Black T indikatörü ilavesi ve amonyak tampon çözeltisi (pH 10) ilavesinin ardından EDTA ile titre edilmiştir. Titrant harcaması kaydedilerek aşağıdaki Denklem 3.1 vasıtasıyla hesaplama gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Kalsiyum karbonat miktarı}(\%) = \frac{0,01 \times V_{EDTA} \times M_{total} \times 100}{M_{titrasyon}} \% \quad (3.1)$$

Bu denklemde kullanılan kısaltmaların açıklamaları şu şekildedir;

- V_{EDTA} : Harcanan titrant miktarı (ml)
- M_{total} : Kum kolonunun toplam kuru ağırlığı (mg)
- $M_{titrasyon}$: Titrasyon ile ölçümü yapılan örnek ağırlığı (mg)

3.4 Atıktan CO₂ ve Enerji Üretimi Potansiyelinin Belirlenmesi

3.4.1 Yemek atıklarının ön işlemleri

Yemekhane atıkları 6 ay boyunca toplanarak tartılmış ve 60°C'lik etüvde 2 gün boyunca kurutulmuşlardır. Kurutulmuş numune öğütülerek 2 mm'lik elekten geçirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Yiyecek atıklarının ön işlemleri; (a) yiyecek atıklarının kurutulması, (b) deneyde kullanılan öğütücü, (c) 2 mm'lik elek ve (d) elenmiş toz numune

3.4.2 Uçucu katı madde tayini

Uçucu katı madde (UKM) tayini için kullanılacak krezeler 550°C'ye ayarlanmış kül fırınında bekletildikten sonra desikatöre konularak soğuması beklenmiştir. Ardından hassas terazi (Şekil 3.8b) yardımıyla krezelerin daraları alınmıştır. Bu sayede krezelerdeki nemin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Sonrasında toz halindeki numune terazi yardımıyla yaklaşık 5 gr olacak şekilde tartılmış ve numune dolu

krozeler (Şekil 3.8c) kül fırınına (Şekil 3.8a) yerleştirilmiştir. 2 saat boyunca 550°C’lik kül fırınında bekletilen numuneler desikatöre (Şekil 3.8d) alınarak soğuması beklenmiş, ardından hassas terazi ile ağırlıkları ölçülerek gerekli hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8 Uçucu katı madde tayini işleminde kullanılan cihaz ve ekipmanlar; (a) kül fırını, (b) hassas terazi, (c) krozeler ve (d) desikatör

Uçucu katı madde tayini hesaplamaları için aşağıdaki Denklem 3.2’den faydalanılmıştır;

$$YK[\%] = \frac{K_{ti} - K_{ts}}{K_{ti} - K_{dara}} \times 100 \quad (3.2)$$

Bu denklemde kullanılan kısaltmaların açıklamaları şu şekildedir;

- YK: Yanma kaybı [Kuru Madde %]’si olarak
- Kdara: Boş porselen kabın ağırlığı [g] olarak
- Kti: Numunenin ağırlığı + Kdara olarak [550 °C’de fırınlanmadan önce]
- Kts: Numunenin ağırlığı + Kdara olarak [550 °C’de fırınlandıktan sonra]

3.4.3 Biyokimyasal metan potansiyeli testi

Biyokimyasal Metan Potansiyeli (BMP) testi anaerobik koşullar altında katı atıklardan ve/veya atıksulardan elde edilebilecek nihai metan miktarı ve üretim kinetiklerinin bulunmasını sağlayan bir metoddur [117]. BMP testi için Sel ve diğ. (2016)'ne ait çalışmada kullanılan modifiye edilmiş ASTM E 1196-92 metodu kullanılmıştır [118]. Yemekhane atıklarının biyogaz üretim potansiyelinin analizi için, 1 ay boyunca toplanan ve karakterizasyon için kurutularak homojenize edilen atık numuneleri 100 ml'lik serum şişeleri içerisine (0,25 gr - 0,5 gr - 0,75 gr - 1 gr - 2 gr - 5 gr olacak şekilde 6 ayrı set 3'er tekrarlı olarak) tartılarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Hazırlanan serum şişelerinden bir kesit

Besiyeri için Tablo 3.2'de verilen makronütrient bileşenleri, mikronütrient olarak ise $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (2 mg/L), H_3BO_3 (0,05 mg/L), ZnCl_2 (0,05 mg/L), $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,038 mg/L), $\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,041 mg/L), $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0,05 mg/L), AlCl_3 (0,05 mg/L), $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,05 mg/L), EDTA (0,5 mg/L) kullanılmıştır.

Besiyerine ayrıca, Piridoksimin ($\text{C}_8\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0,25 mg/L), Nikotinik asit ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$, 0,1 mg/L), Nikotinamid ($\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_2\text{O}$, 0,1 mg/L), DL-pantotenik asit ($\text{C}_9\text{H}_{16}\text{NO}_5 \cdot 1/2\text{Ca}$, 0,05 mg/L), B12 Vitamini (0,05 mg/L), p-aminobenzoik asit ($\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$, 0,05 mg/L), Piridoksin.HCl (B6; $\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}_3 \cdot \text{HCl}$, 0,1 mg/L), D Biotin, Tioktik asit, Folic acid ($\text{C}_{19}\text{H}_{19}\text{N}_7\text{O}_6$, 0,02 mg/L), Riboflavin (0,05 mg/L), Tiamin.HCl (0,1 mg/L) vitamin çözeltilerine ek olarak $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,0263 mg/L) ve $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,033 mg/L) eklenmiştir.

Besiyerine son olarak maya özütü (2 g/L) ve besiyerinde olabilecek oksijeni bağlayarak anaerobik koşulları sağlayan sistein HCl (0,5 g/L) ilave edilmiştir.

Tablo 3.2 BMP testi için kullanılan makronütrient besiyeri bileşenleri

Kimyasal formül	Konsantrasyon
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	10,7 g/L
Na_2HPO_4	3,20 g/L
NH_4Cl	0,6 g/L
KH_2PO_4	0,125 g/L
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,11 g/L
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,1 g/L
NaHCO_3	0,2 g/L

Besiyeri hazırlandıktan sonra her BMP şişesine 50 mL eklenmiş, ardından BMP şişelerine anaerobik aşı çamurundan 5 g eklenerek içeride kalan oksijeni gidermek adına 5 dakika azot gazından geçirilmiş ve şişelerin ağzı kapatılmıştır. Aşı çamuru miktarının sabit tutularak numune miktarının değiştirilmesi sayesinde farklı sübstrat/aşı (S/X) oranlarına sahip numuneler hazırlanarak BMP deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bütün deney setleri için kontrol amaçlı şahit şişeleri de hazırlanmış olup, şahit şişelerine yalnızca besiyeri ve anaerobik aşı çamuru eklenmiştir. Hazırlanan BMP şişeleri karıştırıcılı bir inkübatöre yerleştirilerek 35°C sabit sıcaklıkta inkübe edilmiştir. Her bir numune ve şahit şişelerinde oluşan gaz, bir şırınga yardımı ile (Şekil 3.10) düzenli olarak gaz oluşum miktarları ölçülmüştür.



Şekil 3.10 Serum şişelerinde oluşan gazın şırınga ile alınması

Gaz oluşumu yavaşlama noktasına geldiğinde ise, Gaz Kromatografisi (GC-2014, SHIMADZU Gas Chromatograph, SHIMADZU Corporation, Japan) cihazı (Şekil 3.11) ile gaz bileşenleri (CH_4 , CO_2) analiz edilmiştir.



Şekil 3.11 GC Cihazı

Bu sayede gram kuru katı madde başına oluşan CH_4 ve CO_2 miktarları mL cinsinden tespit edilmiştir. GC’de taşıyıcı gaz olarak helyum kullanılmış, ejektör sıcaklığı 110°C , kolon sıcaklığı 50°C , kolon basıncı ise 150 kPa olarak ayarlanmıştır.

3.4.4 Üst ısı değer tayini

Kurutulmuş ve öğütülmüş toz yemekhane atıkları TS CEN/TS 16023 Bomba kalorimetresi metodu kullanılarak üst ısı değer tayini gerçekleştirilmiştir.

3.4.5 Yiyecek atıklarının elemental analizi

Kurutulmuş ve öğütülmüş toz yemekhane atıklarının Toplam Karbon, Toplam Azot ve Toplam Kükürt miktarlarının tayini amacıyla kullanılan yöntemler sırasıyla TS ISO 10694, TS ISO 13878 ve ASTM E 775-15’dir.

3.5 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Çalışmaları

Bu çalışmada yaşam döngüsü değerlendirmesinin gerçekleştirilmesi amacıyla SimaPro yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım çevresel proseslerin veri toplama, organize etme, analiz ve yönetiminin yanı sıra yaşam döngüsü değerlendirmesinin gerçekleştirilmesini sağlayan bir yazılımdır. Bu program tüm hesaplama ve raporlamalarını ISO14040 ve ISO14044 standartlarına uygun olarak gerçekleştirmektedir.

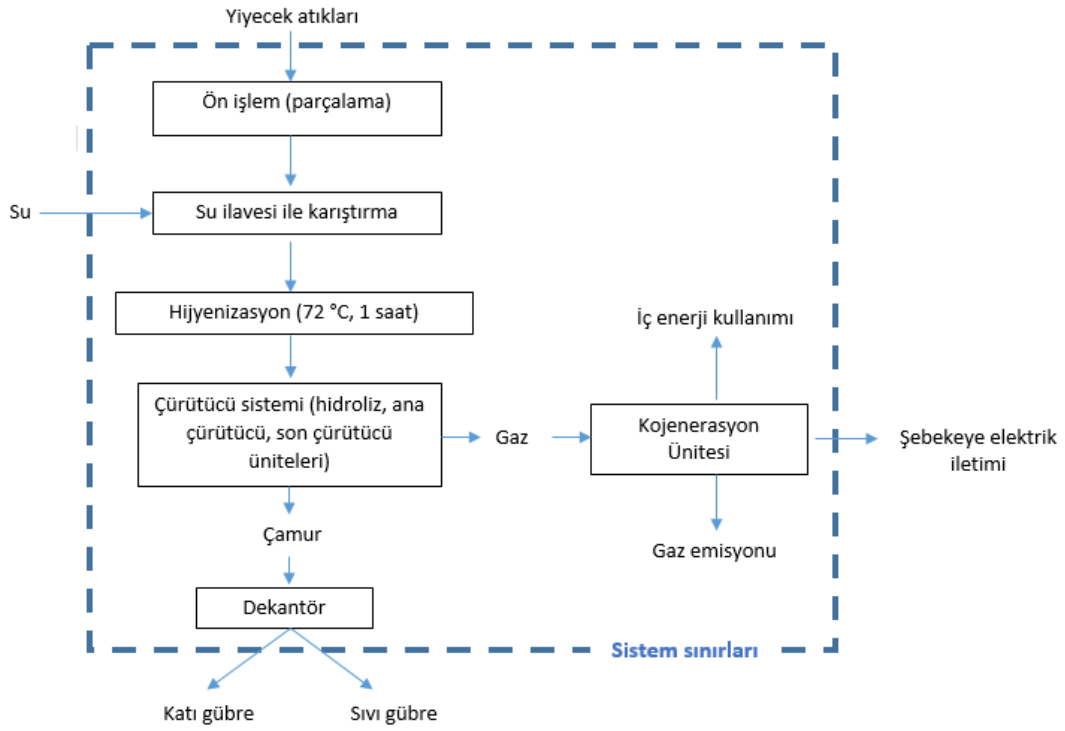
Bu çalışmada yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilirken ISO14040 ve ISO14044'e uygun olarak sırasıyla aşağıdaki işlem basamakları uygulanmaya başlanmıştır;

- LCA'nın amaç ve hedeflerinin tanımlanması,
- Senaryoların tanımlanması,
- Yaşam döngüsü envanterinin derlenmesi,
- Yaşam döngüsü etki analizinin gerçekleştirilmesi,
- Yaşam döngüsü etki analizi sonuçlarının değerlendirilmesi

Amaç tanımlanırken; yapılması planlanan çalışma, çalışmanın gerçekleştirilme nedeni, gibi bilgilerin detaylı bir şekilde verilmesi önemlidir. Çalışmanın kapsamı oluşturulurken ise net bir şekilde; ürün sistemi, fonksiyonel birimler, sistem sınırları, yaşam döngüsü etki analizi metodolojileri, yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılacak etki kategorileri, veri gereksinimleri, varsayımlar, değer seçenekleri, kısıtlar, veri kalitesi gereksinimleri, gerekli ise eleştirel incelemenin türü, ve çalışma için gerek duyulan rapor formatının belirlenmesi gereklidir. Yaşam döngüsü ile ilgili tüm kıstaslar ISO 14044 standardı ile belirlenmiştir.

3.5.1 Atıktan enerji üretim stratejileri için fonksiyonel birim ve sistem sınırlarının belirlenmesi

Yaşam döngüsü değerlendirmesi için fonksiyonel birim 1 kWh enerji üretimi olarak seçilmiştir. Biyometanizasyon, yakma, piroliz ve gazifikasyon sistemleri için belirlenen sistem sınırları sırasıyla Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmektedir. Sistem sınırları içerisine atıkların tesise taşınması ve tesis inşaatları dâhil edilmemiştir. Varsayımsal gerçek ölçekli tesis üzerinden atıkların ilgili tesise ulaştıktan sonra izleyecekleri proses akışları gözetilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.



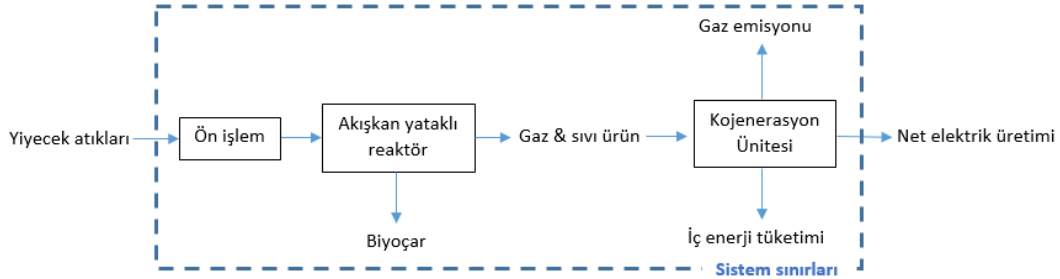
Şekil 3.12 Biyometanizasyon prosesi sistem sınırları

Biyometanizasyon tesisi varsayımı yapılırken İstanbul Büyükşehir Belediyesi Eyüpsultan Biyometanizasyon tesisine ait proses akış şeması temel alınarak ilgili atık girişi, enerji üretimi ve gübre üretimi değerleri göz önünde tutularak, aynı zamanda bu çalışma kapsamında yapılan lab ölçekli biyometanizasyon çalışması verileri ile Ecoinvent version 3.4 veritabanı verilerinden faydalanılmıştır. Çevresel etki hesaplama metodu olarak ReCiPe 2016 seçilmiştir.



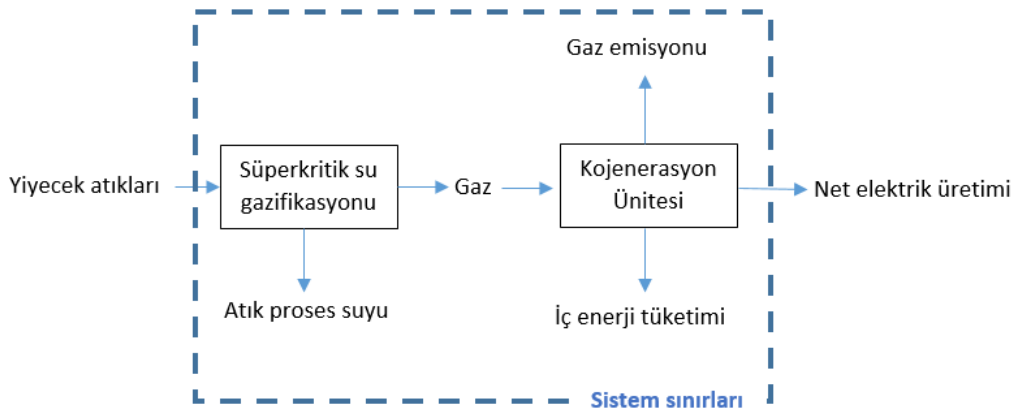
Şekil 3.13 Yakma prosesi sistem sınırları

Yakma tesisi varsayımı yapılırken Tonini v.d. 2020’de [119] verilen Alkmaar yakma tesisi günde 130 ton/gün yiyecek atığı yakımı baz alınarak ölçeklendirilmiştir, bu esnada bu çalışma kapsamında ölçülen toplanmış yiyecek atıklarının üst ısı değeri 17,13 MJ/kg’de dikkate alınmıştır.



Şekil 3.14 Piroliz prosesi sistem sınırları

Piroliz için ön işlem olarak öğütme ve kurutma ön işlemlerinin kullanıldığı varsayılmıştır. Pirolizin 400°C’de gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Model tesiste yan ürün olarak biyogas çıkmakta, biyogaz ve biyo-yag ise kojenerasyon sistemine gönderilerek enerjiye dönüştürülmektedir.

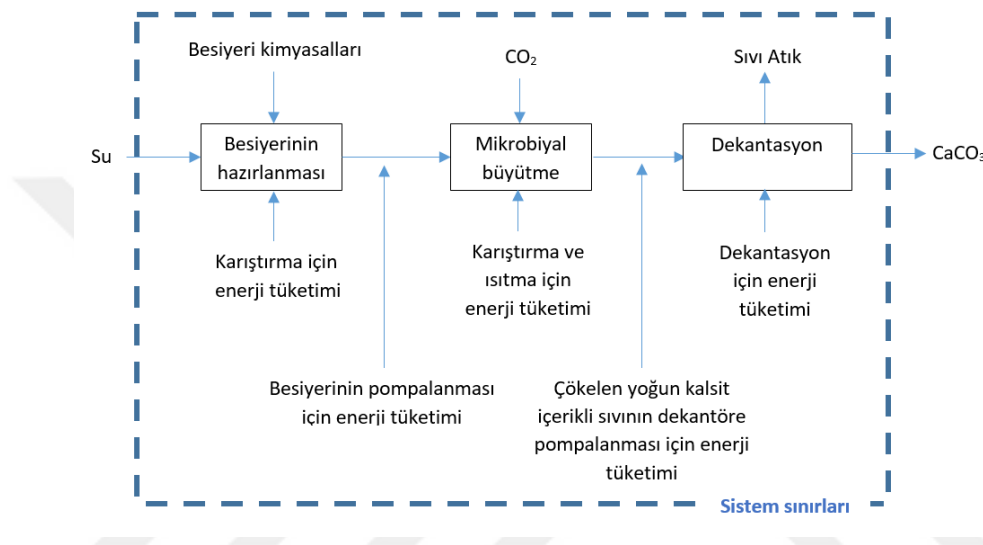


Şekil 3.15 Gazifikasyon prosesi sistem sınırları

Süperkritik-su-gazifikasyonu için sıcaklık 480°C ve bekleme süresi 15 dakika seçilmiştir. Bu gazifikasyon türü için sisteme su ilavesinin yapıldığı varsayılmış ve proses sonunda atık olarak proses suyunun oluştuğu varsayılmıştır. Elde edilen hidrojen zengin yapıdaki sentez gazı ise kojenerasyon ünitesi ile yerinde enerjiye dönüştürülmektedir.

3.5.2 Mikrobiyal kalsit çökelimi için sistem sınırlarının belirlenmesi ve ölçeklendirme

Kalsit çökelimi için fonksiyonel birim 1 kg CaCO₃ üretimi olarak seçilmiş, laboratuvar ölçekli sistem için yaşam döngüsü envanter verileri çıkarılmıştır. Ancak laboratuvar ölçekli gerçekleştirilen çalışmaların temsil edici olabilmesi için gerçek boyutlu sistemlere ölçeklendirilmesi de gereklidir. Bu amaçla oluşturulan gerçek ölçekli tesis modellemesine ait sistem sınırları Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16 MKÇ teorik tesis modeli sistem sınırları

Literatürde bu amaçla Piccino ve diğ. (2016) tarafından hâlihazırda bir ölçeklendirme protokolü bulunmaktadır [120]. Bu protokolde yer alan ölçeklendirme formülleri kullanılarak ölçeklendirme gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirme yapılırken kimyasal miktarı lineer olarak artırılırken çözücü miktarı lab ölçekli çalışmaya göre %20 daha az olarak alınır [120]. Sistemin ihtiyaç duyduğu elektrik ve ısı ihtiyaçlarının ölçeklendirilmesinde ise birçok farklı formülden faydalanılması gereklidir.

3.5.2.1 Reaktörün ısıtılması işleminin ölçeklendirilmesi

Reaktörün ısıtılması aşamasında ölçeklendirme yapılırken ısıtılmada harcanan enerjinin bir kısmının dış ortama kaybedildiği göz önünde bulundurulur. Reaktör yüzeyinden gerçekleşen bu kaybın hesaplamaya dahil edilmemesi ciddi hatalara neden olabilmektedir. Reaktör ısıtılması aşaması için gereken ısı enerjisi Denklem 3.3 yardımıyla hesaplanır [120].

$$Q_{reak} (W.sa) = \frac{C_p \times m_{kar} \times (T_r - T_0) + A \times \frac{k_a}{s} \times (T_r - T_{dış}) \times t}{\eta_{ısı}} \quad (3.3)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler şu şekildedir;

C_p : Sıvının spesifik ısı kapasitesi, J/kg.K

m_{kar} : Sıvı karışımının ağırlığı, kg

T_r : Reaktörün tutulmak istenildiği sıcaklık, K

$T_0=T_{dış}$: Başlangıç sıcaklığı= Dış ortam sıcaklığı, K

t : Isıtma süresi, sa

k_a : Reaktörün izolasyon malzemesinin termal iletkenliği, W/m².K

s : Reaktörün izolasyon kalınlığı, m

$\eta_{ısı}$: Isıtma elemanının verimi, %

3.5.2.2 Reaktörün karıştırılması işleminin ölçeklendirilmesi

Reaktöre beslenecek besiyerinin hazırlanacağı tankta ve reaktörde karıştırma işleminin yapılması gerekmektedir. Bu aşamada enerji tüketimi gerçekleşir ve bu enerji tüketimini hesaplamak için Denklem 3.4'ten faydalanılır [120].

$$E_{karıştırma} (J) = \frac{N_p \times \rho_{kar} \times N^3 \times d^5 \times t}{\eta_{kar}} \quad (3.4)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler şu şekildedir;

N_p : Pervanenin güç katsayısı

ρ_{kar} : Sıvının yoğunluğu

N : Pervanenin dönme hızı, 1/sn

d : Pervane çapı, m

t : Karıştırma süresi, sa

η_{kar} : Karıştırma elemanının verimi, %

3.5.2.3 Sıvı transferinin ölçeklendirilmesi

Laboratuvar ölçekli sistemlerde uygulanmayan ancak gerçek ölçekli sistemlerde besiyeri, çamur ve atıksuyun taşınması işlemlerinde kullanılan pompaların sisteme eklenmesi gereklidir. Bu amaçla Denklem 3.5'ten faydalanılmıştır [120].

$$E_{transfer} (J) = \frac{m \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \Delta h}{\eta_{pompa}} \quad (3.5)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler şu şekildedir;

m: Transfer edilecek kütle, kg

g: Yerçekimi ivmesi, 9,81 m/s²

Δh : Hidrolik yükseklik, m

η_{pompa} : Pompa elemanının verimi, %

3.5.2.4 Dekantasyon (susuzlaştırma) işleminin ölçeklendirilmesi

MKÇ reaktöründe çökelen kalsit içerikli çamurun dekantasyonu için enerji ihtiyacının varsayımının yapılması gereklidir. Bu proses için enerji tüketimi 1-10 kW.saat/ton kuru madde olacak şekilde varsayım yapılır. Eğer laboratuvar ölçekli çalışmalarda filtrasyon/santrifüj aşamalarında zorluk yaşanmaktaysa üst sınır değeri olan 10 kW.saat/ton kuru madde seçilir [120]. Bu çalışmada santrifüj aşamasında çökeltim hızlı ve kolay gerçekleştiğinden ortalama değer olan 5,5 kW.saat/ton kuru madde kabulü yapılmıştır.

3.5.2.5 Kurutmanın ölçeklendirilmesi

Elde edilen susuzlaştırılmış çamurun kurutulması aşaması için Denklem 3.6'dan faydalanılmıştır [120].

$$Q_{kurutma} (J) = \frac{C_p \times m_{sivi} \times (T_{kay} - T_0) + \Delta H_{buh} \times m_{buh}}{\eta_{kurutma}} \quad (3.6)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler şu şekildedir;

C_p : Sıvının spesifik ısı kapasitesi, J/kg.K

m_{sivi} : Çamurun ağırlığı, kg

T_{kay} : Kaynama noktası sıcaklığı, K

T_0 : Başlangıç sıcaklığı, K

ΔH_{buh} : Buharlaşma entalpisi, J/kg

m_{buh} : Buharlaşacak sıvı kütlesi, kg

$\eta_{ısı}$: Isıtma elemanının verimi, %

4

MİKROBİYAL KALSİT ÇÖKELMESİ

4.1 Su Kaynaklarına Ait Su Kalitesi Parametreleri Analiz Sonuçları

Su kaynaklarına ait su kalitesi parametreleri ölçülerek sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Sıcaklık ve pH ölçümleri kaynaktan numune alımı esnasında yapılmıştır. PO₄-P, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N ve Cl⁻ ölçümleri Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarlarında standart yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. Ca, Mg, Cu, Pb ve Ni ölçümleri ise Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında ICP-OES ile yapılmıştır.

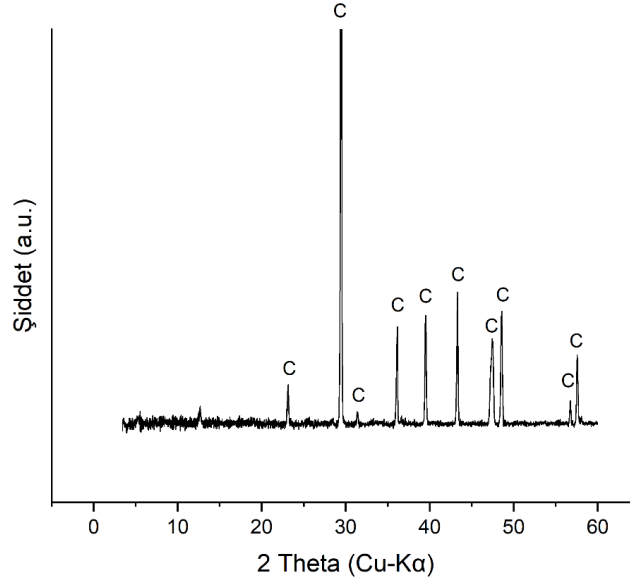
Tablo 4.1 Su kaynaklarına ait su kalitesi parametrelerinin analiz sonuçları

Ölçülen Parametre	Pamukkale Kaynak Suyu	Pamukkale Traverten Havuzu	Kırmızı Su Traverteni
Sıcaklık (°C)	34,9±0,2	15,7±0,4	57,5±0,1
pH	6,297±0,052	6,614±0,075	6,611±0,068
PO ₄ -P (mg/L)	<0,06	<0,06	<0,06
NO ₃ -N (mg/L)	0,013±0,006	0,0695±0,006	0,0175±0,008
NO ₂ -N (mg/L)	<0,01	0,863±0,015	0,023±0,001
NH ₄ -N (mg/L)	0,28±0,004	1,4±0,019	1,4±0,02
Cl ⁻ (mg/L)	50,7±0,18	51,2±0,27	33,9±0,39
Ca (mg/kg)	498,2±13,9	248,4±7,0	534,6±15,0
Mg (mg/kg)	93,43±4,11	94,05±4,14	114,1±5,0
Cu (mg/kg)	<0,20	<0,20	<0,20
Pb (mg/kg)	3,83±0,14	2,76±0,10	4,29±0,16
Ni (mg/kg)	<0,10	<0,10	<0,10

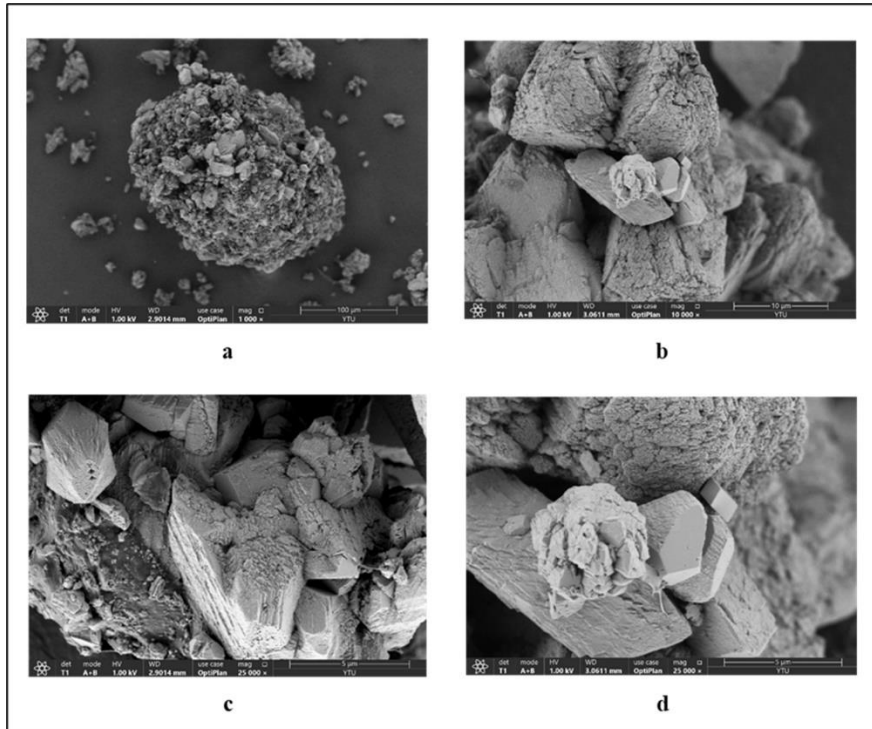
4.2 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeğin SEM, EDX ve XRD analiz sonuçları

Travertenlerde doğal olarak meydana gelen çökeleklerin yapılarını incelemek adına SEM, XRD ve EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen beyaz renkli toz XRD ile incelendiğinde yoğun bir kalsit yapısının varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.1).

Ayrıca XRD ölçümünde örnekte safsızlık varlığı da tespit edilmiştir. SEM incelemelerinde yapının çeşitli farklı kübik, rombohedral ve düzensiz şekilli kristallerin de yapı içerisinde bulunduğu görülmüştür, ancak en fazla görülen kristal yapısı kalsit türü kristallerdir (Şekil 4.2).

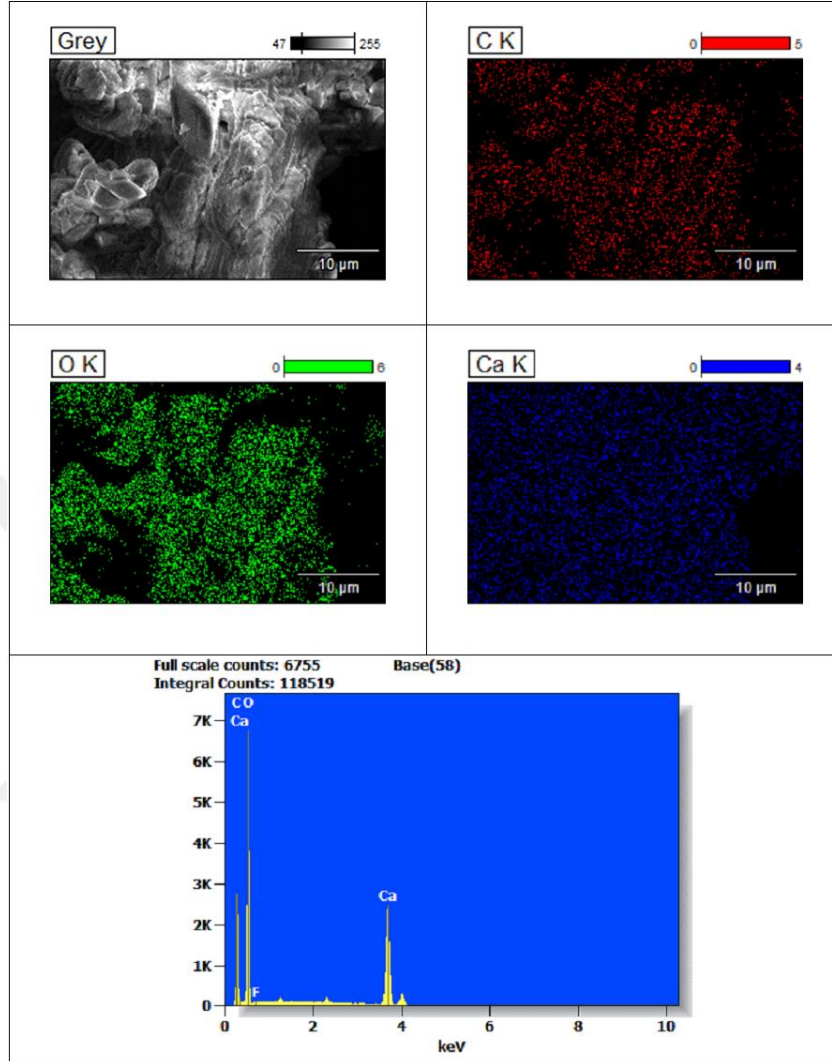


Şekil 4.1 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeleşe ait XRD sonuçları (C: Kalsit)



Şekil 4.2 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeleşe ait farklı noktalardan SEM görüntüleri; (a) 1000x büyütme, (b) 10000x büyütme, (c, d) iki farklı noktadan 25000x büyütme

EDX analizi sonuçları ise yapıdaki kalsiyumun açık bir şekilde varlığını göstermekle birlikte Ca:C:O oranı yaklaşık olarak 1:1:3 olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Pamukkale Travertenlerinden toplanan çökeleşe ait EDX sonuçları

4.3 Üreaz Testi Sonuçları

Stuart Medyasına göre yapılan testte elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir.

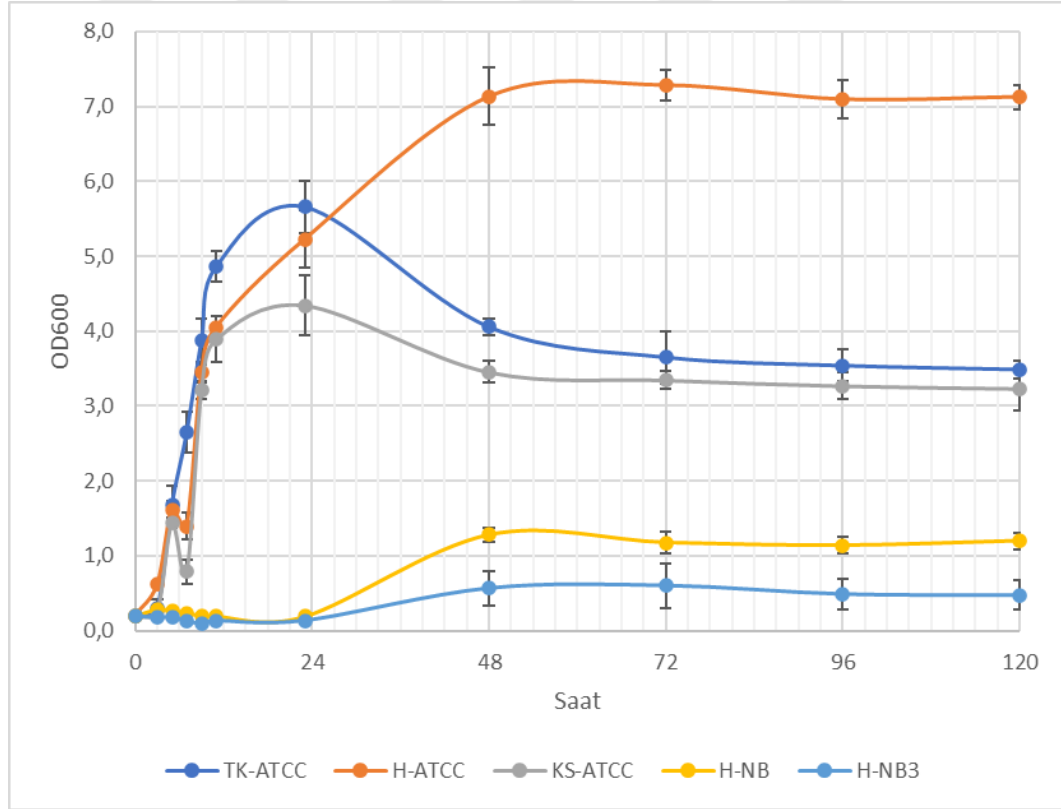
Tablo 4.2 Stuart üre medyası ile yapılmış üreaz testi sonuçları

Kaynak Besiyeri	Pamukkale Kaynak	Pamukkale Traverten Havuzu	Kırmızı Su Traverteni
NB	-	+	-
NB3	-	+	-
ATCC1832	+	+	+

Elde edilen sonuçlara göre Pamukkale Traverten Havuzundan alınan bakteriler 3 farklı besiyerinin üçünde de pozitif sonuç verirken, Pamukkale Kaynağı ve Kırmızı Su travertenini ise sadece ATCC besiyerinde pozitif sonuç vermektedir. Bu durum üç kaynakta da üreaz aktivitesinin varlığını işaret etmekle birlikte ATCC besiyerinin üreaz aktivitesini ortaya çıkarması bakımında diğer besiyerlerine göre daha üstün olduğunu da göstermektedir. NB ve NB3 besiyerleri 48 saat içerisinde, düşük üreaz aktivitesine sahip Pamukkale Kaynak ve Kırmızı Su Travertenleri açısından yetersiz kalmaktadır.

4.4 Çoğalma Kinetiği Sonuçları

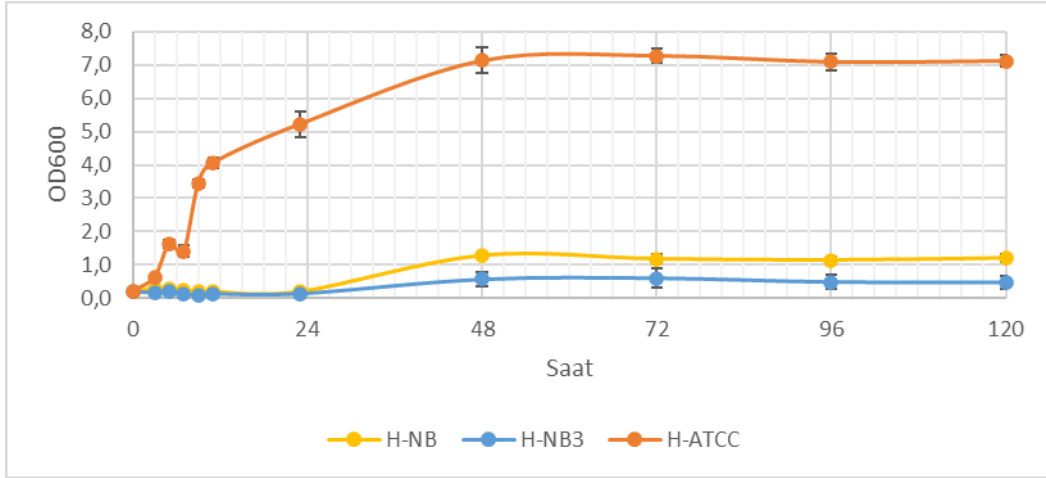
Üreaz pozitif çıkan numuneler için çoğalma kinetikleri çizdirilerek incelenmiştir. 5 Numune için elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 Üreaz pozitif sonucu veren 5 numuneye ait çoğalma sonuçları (TK: Pamukkale Traverten Kaynağı, H: Pamukkale Traverten Havuzu, KS: Kırmızı Su Travertenini, ATCC: ATCC1832 besiyeri)

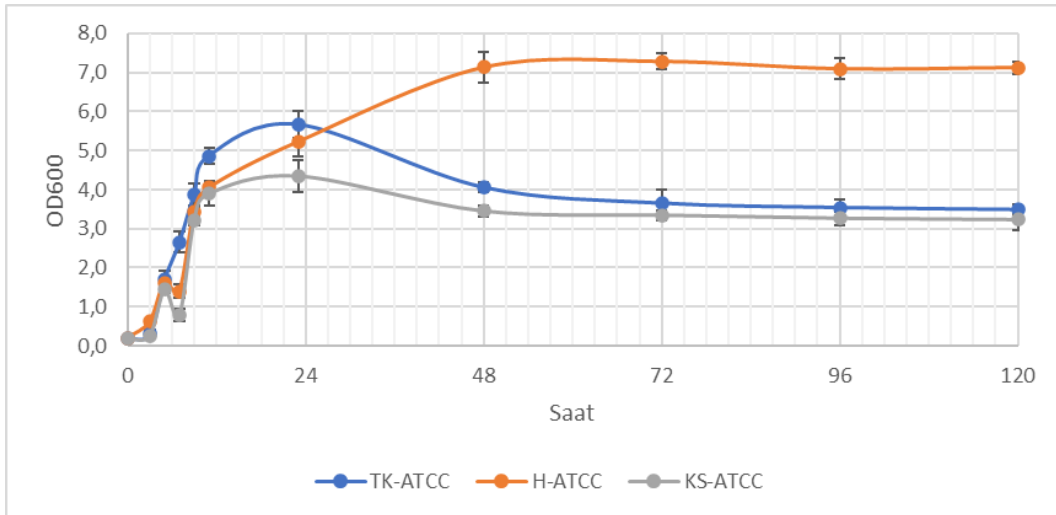
Bu sonuçları yorumlayabilmek için 2 ayrı kategori oluşturulmuştur. İlk kategori Pamukkale Traverten Havuzu numunesinin farklı besiyerlerinde büyütülmesidir.

Buna göre elde edilen grafik Şekil 4.5'te verilmiştir. Sonuçlar Pamukkale Traverten Havuzuna ait karışık kültürün açık bir şekilde ATCC1832 medyasını tercih ettiklerini göstermiştir.



Şekil 4.5 Havuz numunesinin farklı besiyerlerinde çoğalmaları

Belirlenen bir diğer kategori ise ATCC1832 medyasında farklı kültürlerin çoğalma durumlarıdır. Buna göre elde edilen grafik Şekil 4.6'da verilmiştir. Pamukkale Traverten Kaynağından alınan kültür ilk 24 saat içerisinde ciddi bir çoğalma gösterdikten sonra çoğalma hızı düşerek 72 saatten sonra sabitlenmektedir. Pamukkale Traverten Havuzuna ait kültür ise ilk 12 saat hızlı bir çoğalma, ardından 48 saate kadar lineer bir artış trendi izledikten sonra 48. saatten itibaren OD600 değeri fazla bir değişim göstermemektedir.



Şekil 4.6 ATCC1832 Besiyerinde farklı kaynaklara ait karışık kültürlerin çoğalmaları (TK: Pamukkale Traverten Kaynağı, H: Pamukkale Traverten Havuzu, KS: Kırmızı Su Traverteni, ATCC: ATCC1832 besiyeri)

4.5 İnkübasyon Süresi Sonundaki pH Değişimleri

120 saatlik çoğalma süresi sonunda pH değişimi aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 4.3).

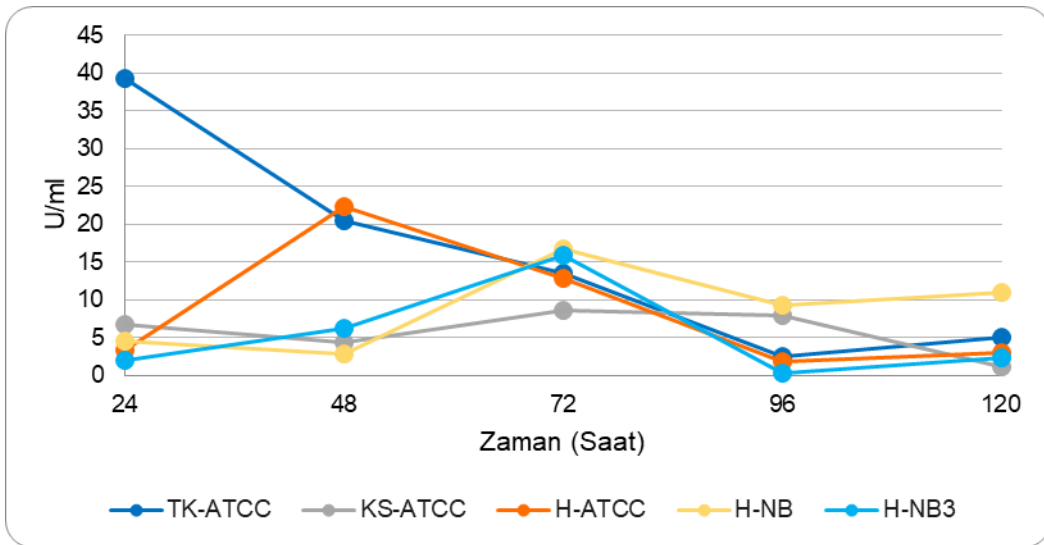
Tablo 4.3 Çoğaltma sonrasındaki pH değişimleri (120 saat sonunda)

Kaynak/Besiyeri	Başlangıç pH	Son pH
Traverten Kaynak-ATCC	7	9,27
Kırmızı Su-ATCC	7	5,10
Traverten Havuzu-NB	7	8,37
Traverten Havuzu-NB3	7	7,91
Traverten Havuzu-ATCC	7	9,38

Ürenin amonyağa hidrolizi durumunun pH artışına neden olduğu bilindiğinden özellikle Pamukkale Traverten Kaynağı ve Pamukkale Traverten Havuzlarında üreaz aktivitesinin yüksek olma ihtimali tahmin edilmektedir. Bu durumun net tespiti adına bir sonraki adımda Fenol-Hipoklorit test yöntemi ile analiz gerçekleştirilmiştir.

4.6 Üreaz Aktivitesi Testi Sonuçları

Bu metoda göre üreaz aktivitesinin tespiti amacıyla öncelikle Amonyum klorit standart çözeltisi vasıtasıyla kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Daha sonra numuneler 5 gün boyunca inkübe edilerek fenol-hipoklorit test metoduna göre üreaz aktiviteleri gün gün tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7’de verilmiştir.

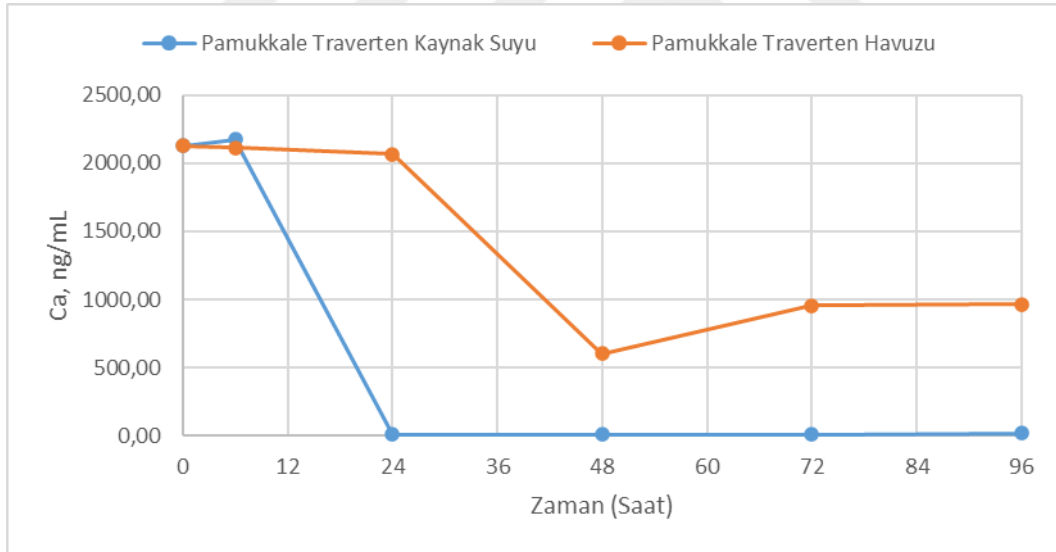


Şekil 4.7 5 numuneye ait fenol-hipoklorit test metoduna göre üreaz aktivitesi sonuçları

Buna göre en yüksek üreaz aktivitesi ATCC1832 besiyerinde zenginleştirilen Pamukkale Traverten Kaynağında ilk 24 saat içerisinde 39,3 U/ml olarak gözlenmiş olup bu değer sonraki 24 saatte 20,5 U/ml değerine düşmektedir. ATCC1832 besiyerinde zenginleştirilen Traverten Havuzuna ait numune ise 48 saat içerisinde 22,4 U/ml maksimum üreaz aktivitesine ulaşmıştır. NB ve NB3 medyalarında zenginleştirilen Traverten Havuzu numuneleri ise 72. saatte sırasıyla 16,7 ve 15,9 maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Kırmızı Su kaynağına ait ATCC1832 medyasında zenginleştirilmiş numunenin üreaz aktivitesi ise 5 gün içerisinde 8,5 U/ml ile 1,1 U/ml değerleri arasında değişim göstermiştir.

4.7 İnkübasyon Esnasında Sıvı Medyadaki Kalsiyum Konsantrasyonunun Değişimi

96 saatlik inkübasyon esnasındaki sıvı besiyerinde gerçekleşen kalsiyum konsantrasyonu değişimi ICP-OES vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. ICP-OES ölçümü (Shimadsu ICPE-9000) sonuçları Şekil 4.8'de verilmektedir.

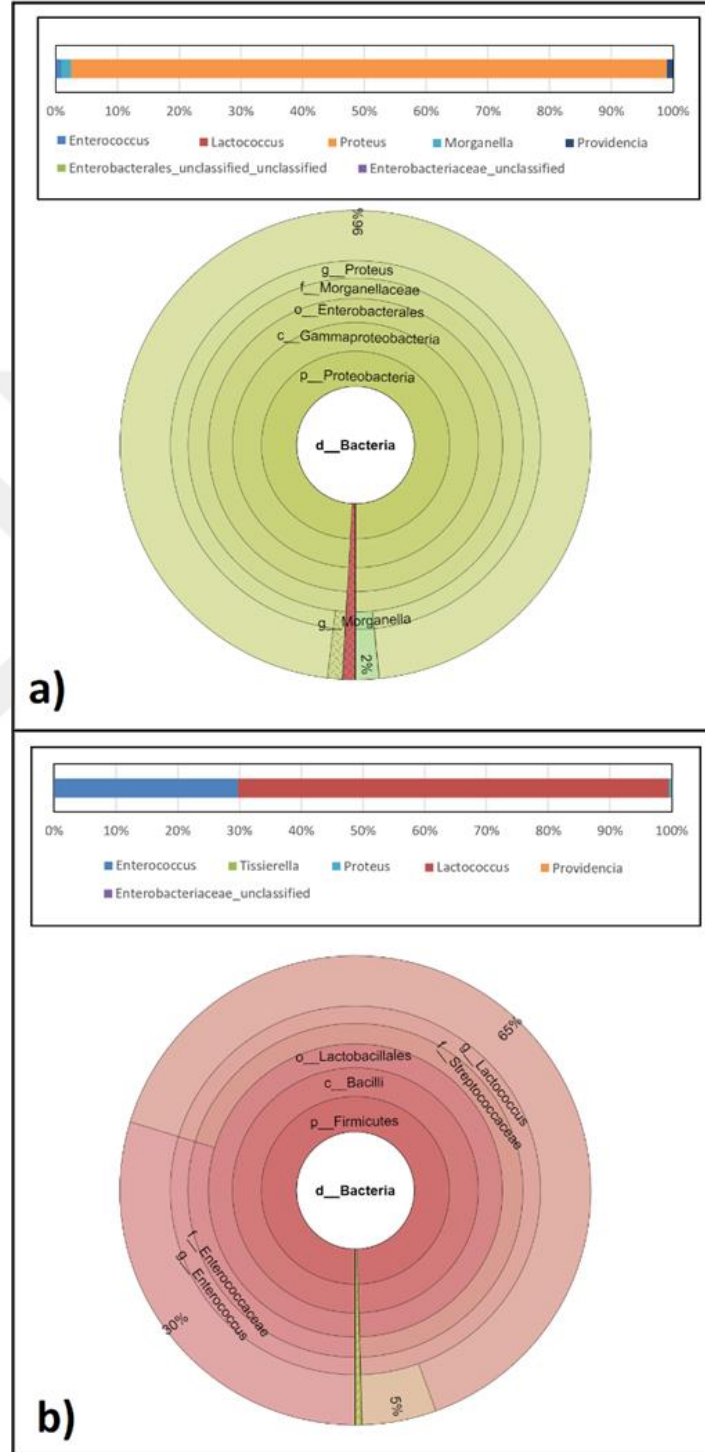


Şekil 4.8 İnkübasyon esnasında sıvı medyada kalsiyum konsantrasyonu değişimi

4.8 Mikrobiyal Tür Analizi Sonuçları

Pamukkale Traverten Kaynağından alınarak ATCC1832 besiyerinde zenginleştirilmiş bakterilerde, filum/şube seviyesindeki sonuçlar %0,89 Firmicutes ve %99,11 Proteobacteria varlığını göstermektedir (Şekil 4.9). Buna karşılık Pamukkale Traverten Havuzundan alınan zenginleştirilmiş bakteriler ise %99,57 Firmicutes ve %0,43 Proteobacteria sonucunu vermektedir.

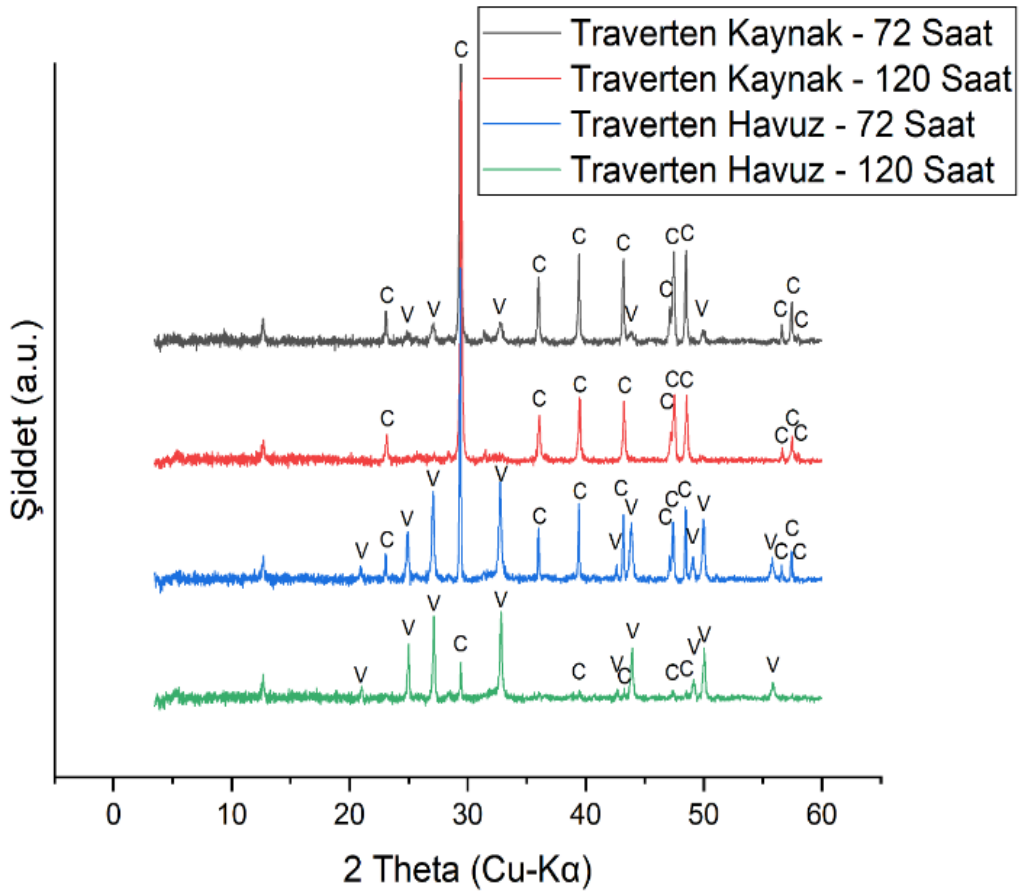
Proteobacteria filumuna ait olan *Proteus*, Pamukkale Traverten Kaynağında en fazla bulunan cins olarak tespit edilmiştir. Pamukkale Traverten Havuzundaki zenginleştirmede ise iki farklı cins tespit edilmiş olup bunlar %69 ile *Lactococcus* ve %29 ile *Enterococcus*'tur.



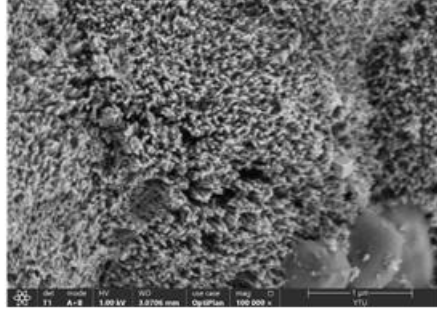
Şekil 4.9 Filum ve cins bakımından metagenomik analiz sonuçları; a) Traverten Kaynağından alınarak ATCC1832'de zenginleştirme, b) Traverten Havuzundan alınarak ATCC1832'de zenginleştirme.

4.9 İnkübasyon Sonucu Elde Edilen Çökeleklerin XRD, SEM ve EDX Analizi Sonuçları

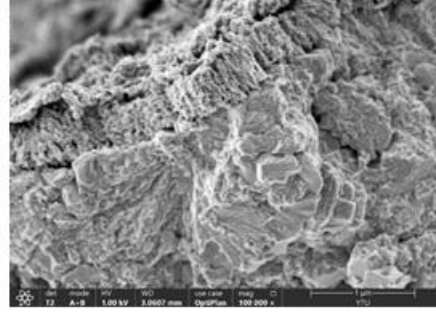
XRD sonuçlarına göre 72 saat inkübe edilen Traverten Kaynak bakterileri, 72 saat inkübe edilen Traverten Havuz bakterileri ve 120 saat inkübe edilen Traverten havuz bakterilerinin oluşturduğu çökeleklerde kalsitin yanı sıra vaterit yapısı da görülmektedir (Şekil 4.10). Traverten Kaynak bakterilerinin inkübasyon süresi 120 saate çıktığında ise çökelekte sadece kalsit pikleri tespit edilmiştir. SEM görüntüleri ise XRD sonuçlarını destekler niteliktedir (Şekil 4.11). EDX sonuçları incelendiğinde Ca:C:O oranının yaklaşık olarak 1:1:3 olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.12).



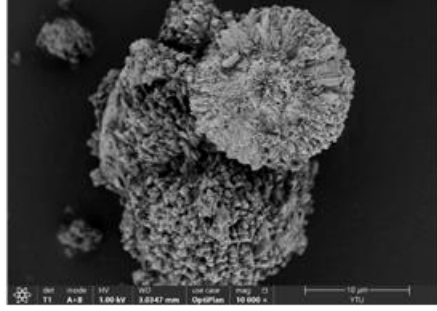
Şekil 4.10 İnkübasyon süresi sonunda oluşan bakteriyel çökeleklere ait XRD sonuçları (C: Kalsit, V: Vaterit)



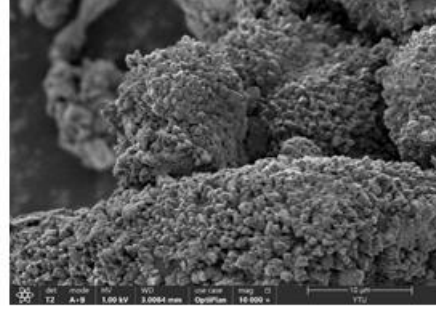
(a)



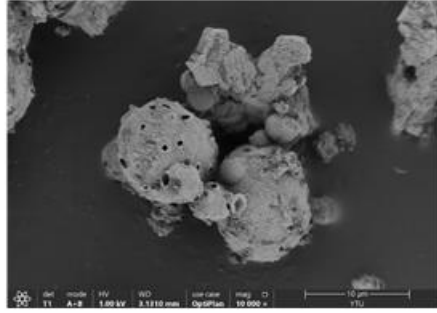
(b)



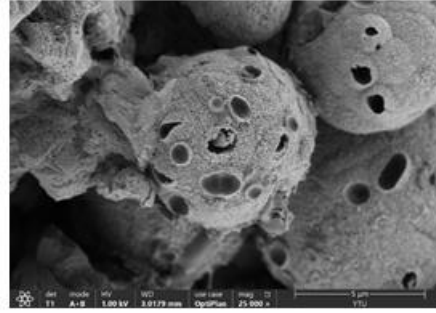
(c)



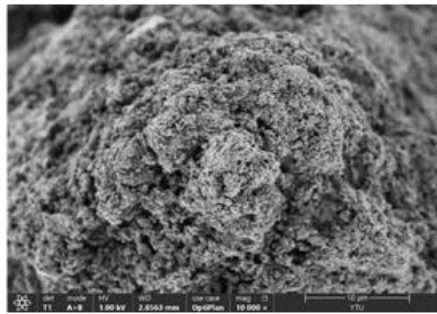
(d)



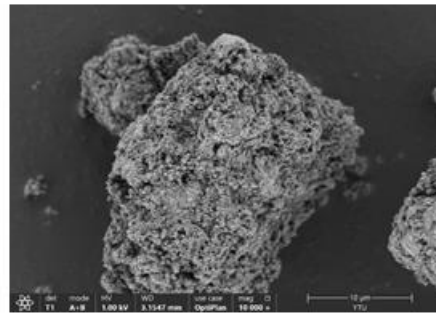
(e)



(f)

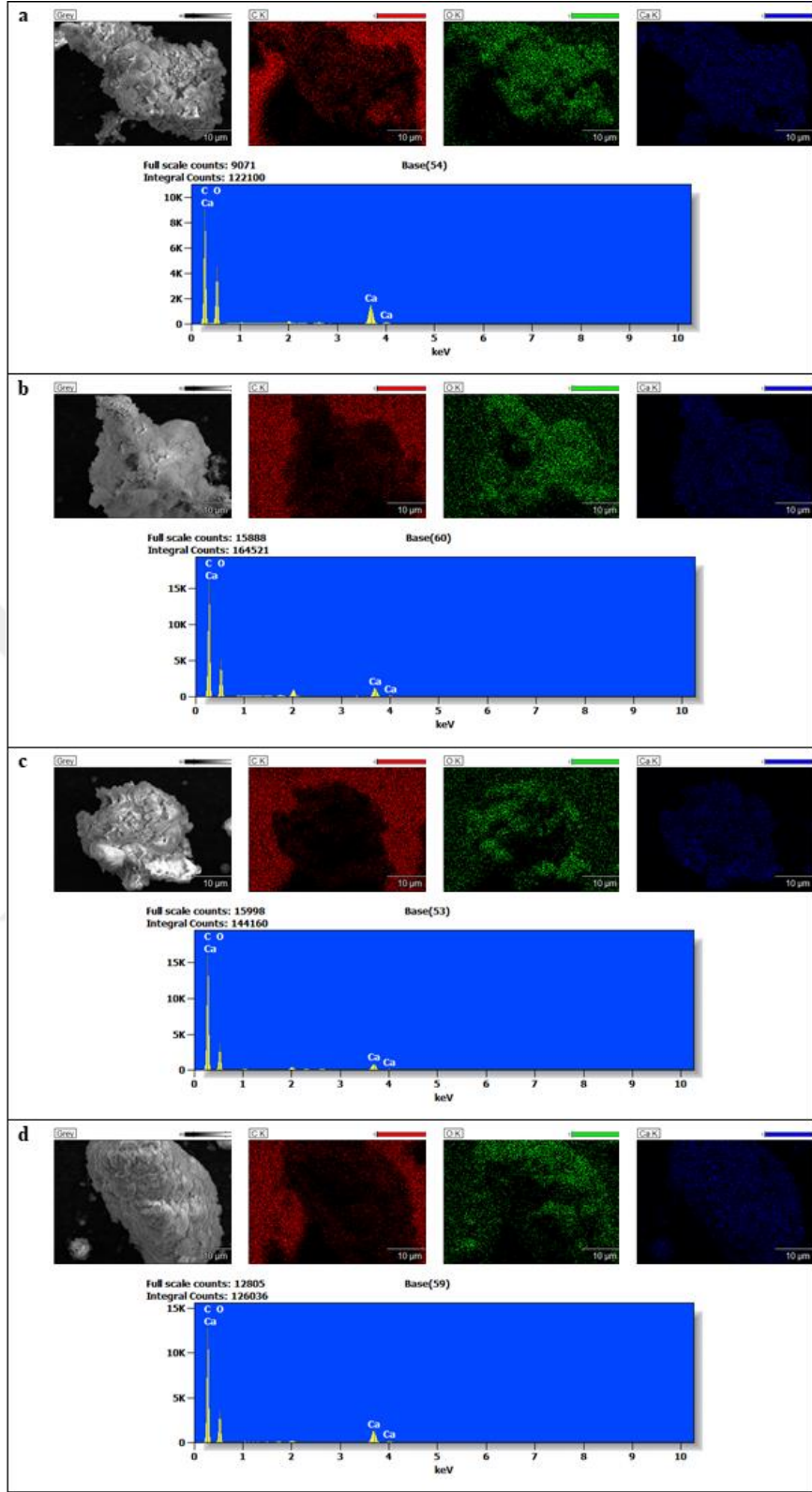


(g)



(h)

Şekil 4.11 ATCC1832 besiyeri ile inkübasyon sonrası oluşan bakteriyel çökeklere ait SEM görüntüleri; (a,b) Traverten Kaynak bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (c,d) Traverten Kaynak bakterilerinin 120 saat inkübasyonu, (e,f) Traverten Havuz bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (g,h) Traverten Havuz bakterilerinin 120 saat inkübasyonu.

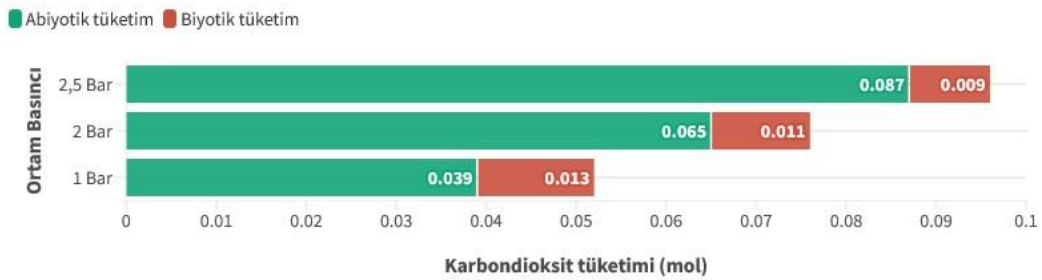


Şekil 4.12 ATCC1832 besiyeri ile inkübasyon sonrası oluşan bakteriyel çökeklere ait EDX sonuçları; (a) Traverten Kaynak bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (b) Traverten Kaynak bakterilerinin 120 saat inkübasyonu, (c) Traverten Havuz bakterilerinin 72 saat inkübasyonu, (d) Traverten Havuz bakterilerinin 120 saat inkübasyonu.

4.10 Farklı Basınç ve Karbondioksit Oranları ile Sistemin İşletilmesi Sonuçları

Karbondioksit tüketiminin belirlenmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar Şekil 4.13'te verilmiştir. 1 Bar, 2 Bar ve 2,5 Bar basınç koşulları altında gerçekleştirilen çalışmalarda atmosfer basıncında (1 Bar) sistemin 24 saatte abiyotik olarak 0,039 mol CO₂ tüketirken biyotik olarak ise 0,013 mol CO₂ tüketimi yaptığı tespit edilmiştir. Basınç artışı abiyotik karbondioksit tüketimini olumlu etkilemektedir. Ancak basınç artışı ile biyotik karbondioksit tüketimi artışı gerçekleşmemiş, tam tersine basınç artışı ile biyotik tüketim az miktarda bile olsa olumsuz yönde etkilenmiştir. Yine de bu düşüşün istatistiksel açıdan önemli bir değişim olduğundan bahsedilemez.

Dolayısıyla mikrobiyal metabolizma açısından basınçlandırmanın beklenen derecede verimli sonuçlar vermediği söylenebilir. Bu durum mikroorganizmaların basınç koşullarından olumsuz etkilenmesinden kaynaklanıyor olabileceği gibi, basınç artışına bağlı sıvı ortamın basınçlandırılması ile çözünmüş karbondioksitin ortam pH'ını düşürmesi ve mikroorganizmaların pH değişiminden olumsuz etkilenmesinden kaynaklanmış olabilir.



Şekil 4.13 Basınçlandırmaya bağlı karbondioksit tüketimlerindeki değişim

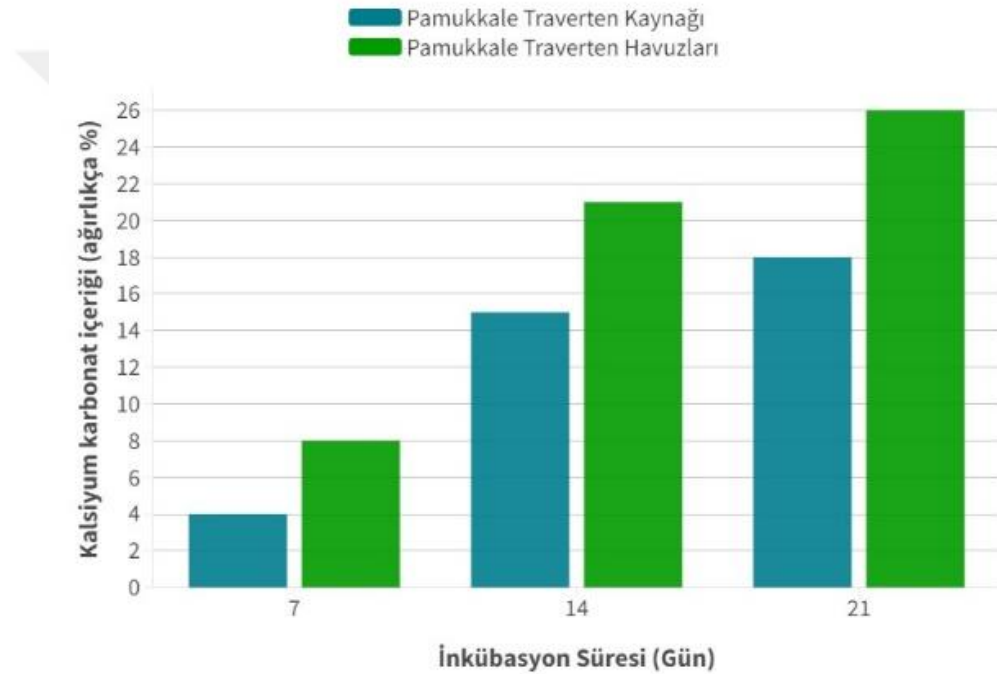
4.11 MKÇ Prosesinin Alternatif Uygulamalarda Kullanılabilirliğinin Test Edilmesi

4.11.1 Kum kolonu sonuçları

Kum kolonu sonuçları Şekil 4.14'te verilmiştir. Buna göre Pamukkale Traverten Kaynağından alınarak ATCC1832 medyasında zenginleştirilen karışık kültürün kum kolonuna eklenmesi ve kum kolonunda 4, 14 ve 21 gün inkübasyonu

sonunda oluşan kalsiyum karbonat miktarı kum kolonu ağırlığının sırasıyla %4, %15 ve %18'ini oluşturduğu belirlenmiştir.

Ayrıca kalsiyum karbonat oluşum hızının 14. günden itibaren azalmaya başladığı görülmektedir. Pamukkale Traverten Havuzlarından alınarak zenginleştirilen bakterilerin kum kolonunda büyütülmesinde ise 7. Günde kalsiyum karbonat içeriği %8 iken, 14. Günde %21 ve 21. Günde %26 olarak ölçülmüştür. Kum kolonundan elde edilen sonuçlar bu türlerin hem toprak iyileştirmesi, hem de kendi kendini iyileştirebilen beton uygulamalarında kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.14 7, 14 ve 21 günlük kum kolonu çalışmaları sonunda kalsiyum karbonat miktarlarının değişimi

Kalsiyum karbonat birikim hızındaki zamana bağlı değişimin birkaç farklı sebebe bağlı olarak oluşmuş olabileceği düşünülmüştür [121]. Bunlar;

- Zamana bağlı biyofilm ve kalsit oluşumu nedeniyle sübstrata erişimi kısıtlayıcı difüzyon bariyerinin oluşma ihtimali [21],
- Kolondaki limitleyici faktörlerde ötürü (oksijen, pH, sübstrat) baskın türlerin değişime uğraması,
- pH değişimine bağlı olarak kalsiyum karbonat çökelme reaksiyonlarının etkilenmesidir.

4.12 Ölçeklenen MKÇ Prosesinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları

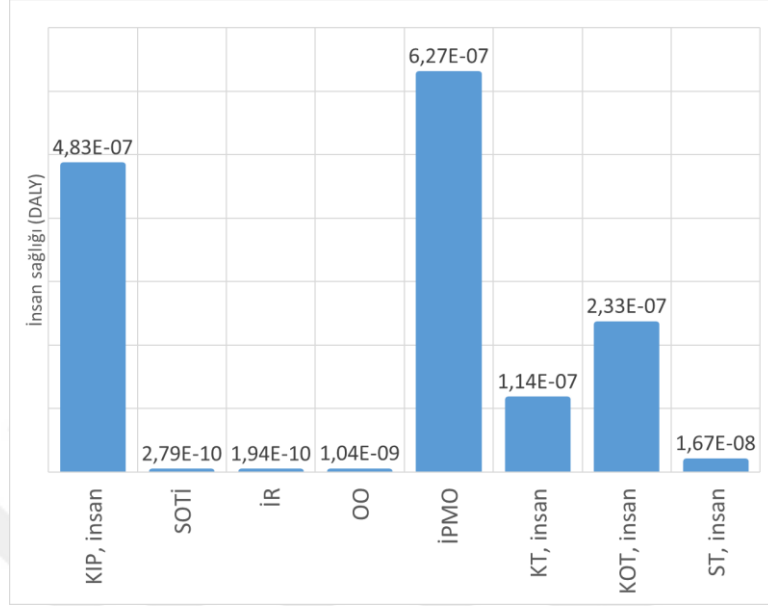
Ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökmesi prosesine ait yaşam döngüsü etki değerlendirme sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları

Orta nokta indikatörleri	Birim	Çevresel etki
Küresel ısınma potansiyeli	kg CO ₂ eşd.	0,52
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi	kg CFC11 eşd.	5,25E-07
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eşd.	0,0229
Ozon oluşumu, insan sağlığı	kg NO _x eşd.	0,00114
İnce partikül madde oluşumu	kg PM _{2,5} eşd.	0,000999
Ozon oluşumu, karasal ekosistem	kg NO _x eşd.	0,00117
Karasal asidifikasyon	kg SO ₂ eşd.	0,00239
Tatlı su ötrofikasyonu	kg P eşd.	0,000268
Deniz ötrofikasyonu	kg N eşd.	0,000182
Karasal ekotoksosite	kg 1,4-DCB	4,84
Tatlı su ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	0,0445
Deniz ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	0,0562
Kanserojen toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	0,0344
Kanserojen olmayan toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	1,02
Arazi kullanımı	m ² a ekin eşd.	0,232
Maden kaynağı kıtlığı	kg Cu eşd.	0,00397
Fosil kaynak kıtlığı	kg petrol eşd.	0,15
Su tüketimi	m ³ /kWh	0,0145
Zarar değerlendirme		
İnsan Sağlığı	DALY	1,48E-06
Ekosistem	tür.yıl	4,59E-09
Kaynaklar	USD2013	4,38E-02

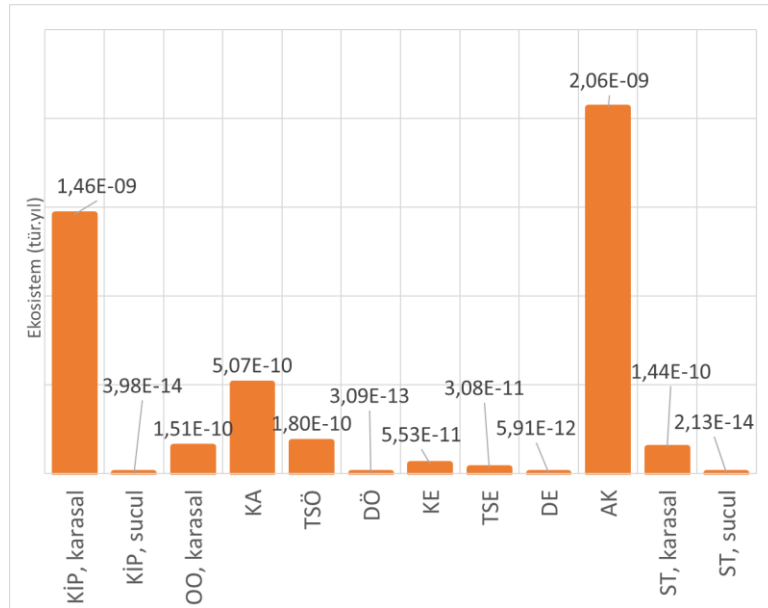
Mikrobiyal kalsit çökmesi her ne kadar suda çözünmüş karbondioksitin kalsiyum ile birleşerek kalsiyum karbonat yapısına dönüşümünü temel alan bir proses olsa da, proses için enerji tüketimleri ve besiyerine eklenen kimyasalların türleri ve miktarından kaynaklanan etkiler nedeniyle küresel ısınma potansiyeline artı olarak etki eden bir yöntem olduğu görülmektedir.

İnsan sağlığına etki (Şekil 4.15) bakımından en büyük etkilerin sırasıyla, ince partikül madde oluşumu, küresel ısınma potansiyeli ve Kanserojen olmayan toksisite olduğu tespit edilmiştir.



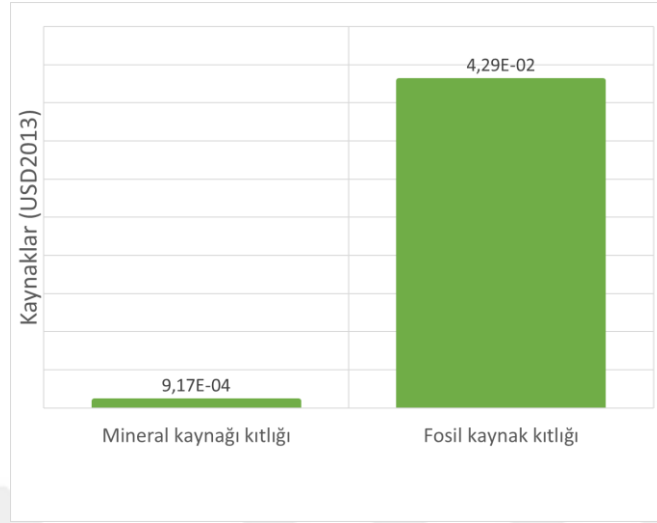
Şekil 4.15 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

Ekosisteme etki (Şekil 4.16) bakımından en büyük etki arazi kullanımı olarak tespit edilmiştir ve bu durum kullanılan farklı kimyasalların üretimi aşamalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.16 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

Kaynak varlığına en büyük etkinin fosil kaynak kıtlığına ait etkilerden kaynaklandığı belirlenmiştir (Şekil 4.17).

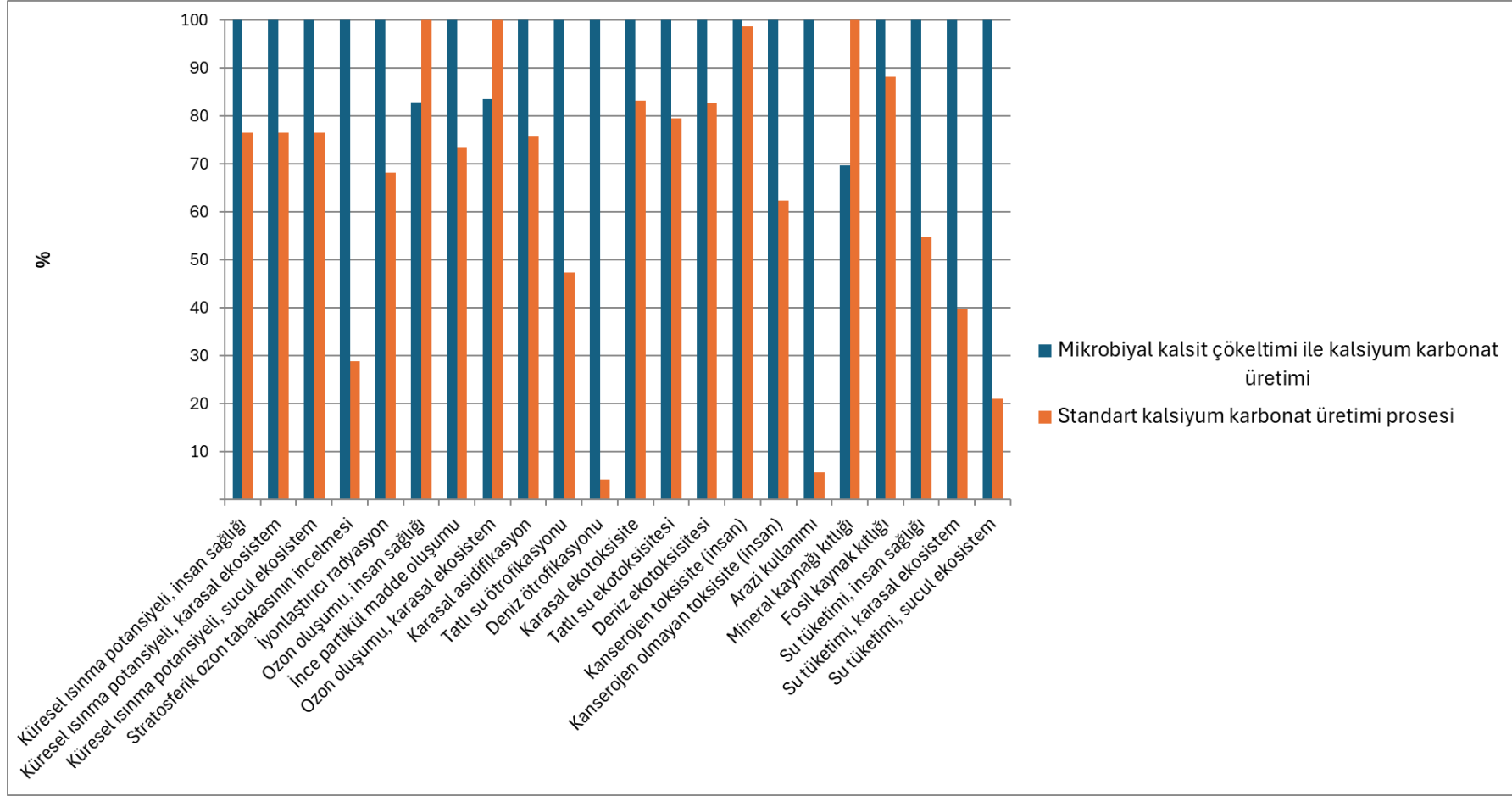


Şekil 4.17 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökeltmesi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

4.13 Ölçeklenen MKÇ ve Kalsit Minerali Çıkarılması Proseslerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçlarının Kıyaslanması

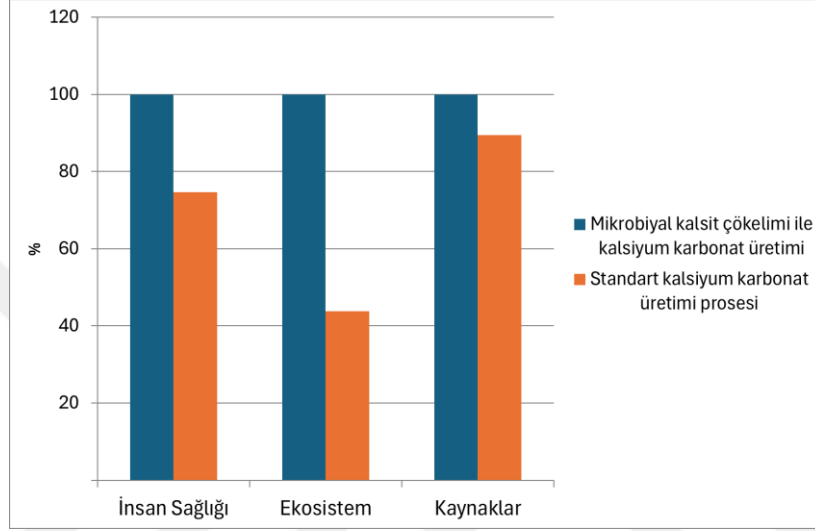
Ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökeltmesi prosesinin çevresel etkilerinin kıyaslanması etkilerin anlaşılabilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle Ecoinvent veritabanında bulunan standart kalsiyum karbonat minerali ekstraksiyonu (Calcium carbonate, precipitated, market for calcium carbonate, precipitated, APOS) prosesinin 1 kg CaCO_3 üretimiyle, ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökeltimi prosesinin 1 kg CaCO_3 üretiminin çevresel etkileri kıyaslanmıştır.

Proses karşılaştırması yapıldığında (Şekil 4.18) ozon oluşumu ve mineral kaynak kıtlığı bakımından standart kalsiyum karbonat üretimi prosesi daha yüksek çevresel etki gösterirken, diğer etkiler bakımından ise ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökeltmesi daha yüksek sonuçlar vermektedir. İki proses arasındaki fark özellikle deniz ötrofikasyonu ve arazi kullanımı açısından oldukça fazladır.



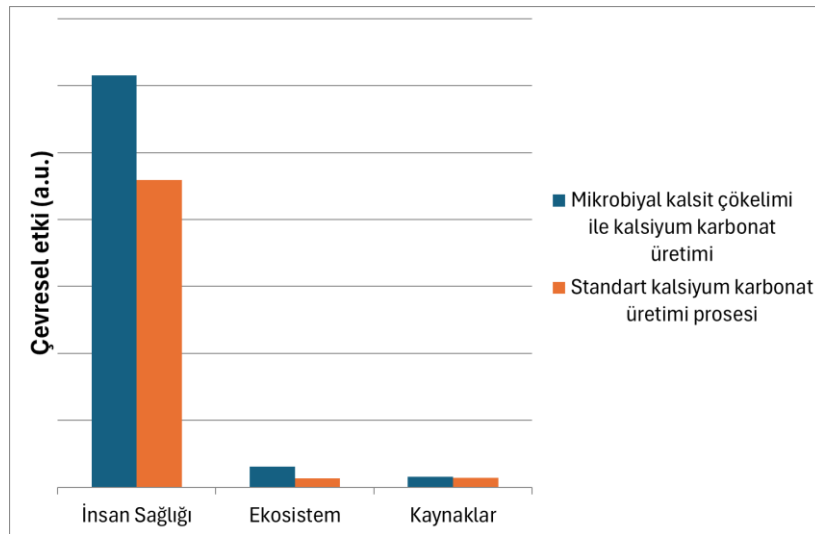
Şekil 4.18 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökeltmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait yaşam döngüsü değerlendirme karakterizasyon sonuçları

Çevresel zarar değerlendirmesi (Şekil 4.19) incelendiğinde mikrobiyal kalsit çökmesinin çevresel etkileri standart kalsiyum karbonat üretim prosesinden daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun kullanılan besiyerine eklenen çeşitli kimyasallardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Kullanılan besiyerlerine alternatif daha az çevresel etkiye sahip besiyerlerinin kullanımı ile çevresel etkilerin azaltılabilme ve proses iyileştirmeleri ile standart kalsiyum karbonat üretimi prosesinden daha iyi sonuçlar alınma potansiyelinin bulunduğu söylenebilir.

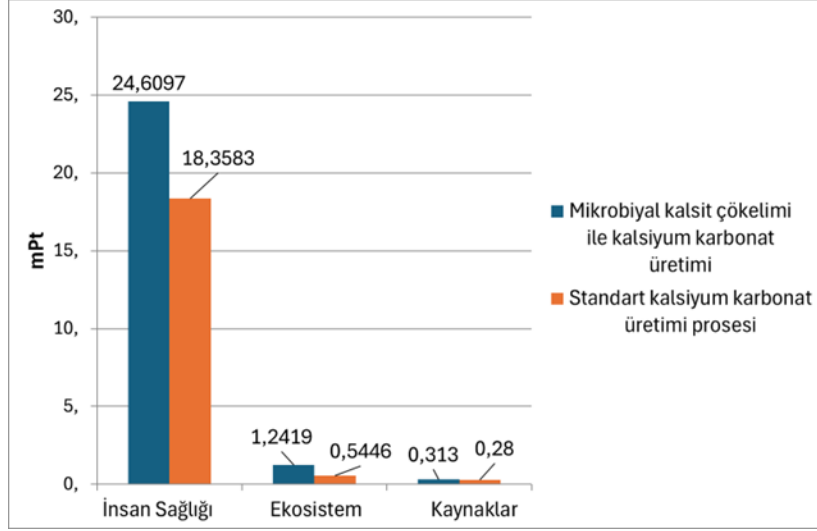


Şekil 4.19 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait son nokta zarar değerlendirmesi sonuçları

Normalizasyon (Şekil 4.20) ve ağırlıklandırma (Şekil 4.21) sonuçları incelendiğinde en büyük etkinin insan sağlığına olan etki olduğu görülmüştür.



Şekil 4.20 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait yaşam döngüsü değerlendirmesi normalizasyon sonuçları



Şekil 4.21 Ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi ve kalsit minerali çıkarılması proseslerine ait yaşam döngüsü değerlendirme ağırlıklandırma sonuçları

5

YİYECEK ATIKLARINDAN ENERJİ ÜRETİMİNDE MKÇ İLE KARBON YAKALAMA

5.1 Atıktan CO₂ ve Enerji Üretimi Potansiyelinin Belirlenmesi

5.1.1 Yiyecek atığının fizikokimyasal analiz sonuçları

Yiyecek atığının uçucu katı madde, nem, kül, üst ısı değeri ve elemental analizine ait sonuçlar Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Yiyecek atığının fizikokimyasal bileşimi

Parametre	Değer
Nem (% ıslak ağırlık)	43,4
Uçucu katı madde (% kuru ağırlık)	93,3
Kül (% kuru ağırlık)	6,7
C (% kuru ağırlık)	73,4
N (% kuru ağırlık)	3,87
S (% kuru ağırlık)	0,22
C/N	15,1
Üst Isıl Değer (MJ/kg)	17,13

5.1.2 BMP sonuçları

Hesaplamalar (Denklem 3.2) sonucunda kurutulmuş yemek atığının UKM oranı %93,3 olarak belirlenmiştir (Tablo 5.1) . Her bir reaktöre eklenen çamur miktarı ise 0,229 g UKM’dir. Buna göre farklı atık miktarları ile kurulan reaktörlerin S/X (g UKM substrat/g UKM aşı) oranları Tablo 5.2’de verilmiştir.

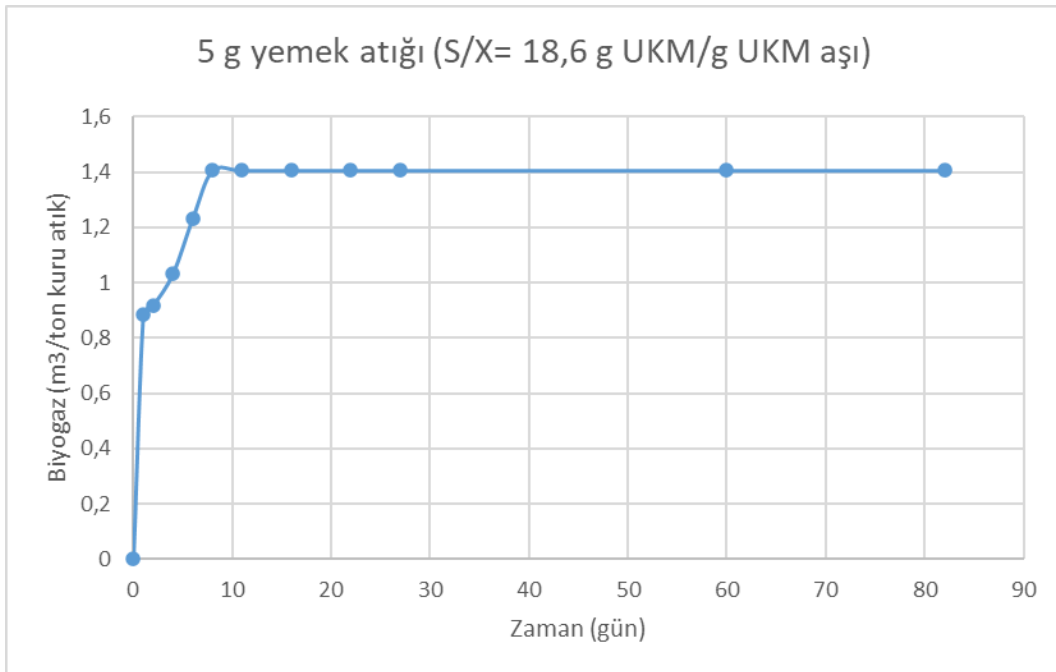
Tablo 5.2 Reaktörlerin S/X oranları

Atık miktarı (g)	0,25	0,5	0,75	1	2	5
S/X (g UKM substrat/g UKM aşı)	1,02	1,86	2,79	3,72	7,44	18,6

5.1.2.1 1 g, 2 g ve 5 g yemek atığına ait biyogaz üretimi sonuçları

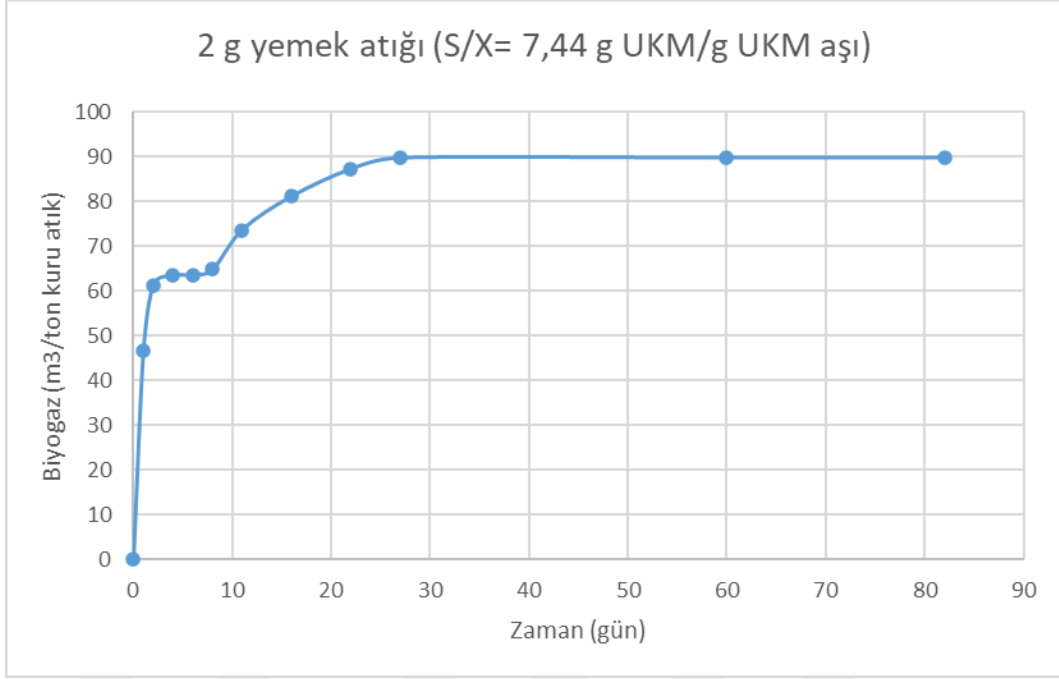
Tez çalışması kapsamında öncelikle 1 g, 2 g ve 5 g yemek atığı kullanılarak biyogaz verimliliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

5 g yemek atığı ile yapılan çalışmada biyogaz üretimi hızla artmış (Şekil 5.1) ve yaklaşık olarak 8. günde dengeye ulaşmıştır. 82 günlük deney sonunda toplam biyogaz üretimi 1,4 m³/ton olarak tespit edilmiştir. Deney sonunda pH değeri 3,9 olarak bulunmuştur. Başlangıçtaki artış trendine ve pH'a bakılarak bu deney setine ait 18,6 g UKM/g UKM aşısı değerinin uygun olmadığı ve daha düşük bir S/X oranı ile deneylerin tekrarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.



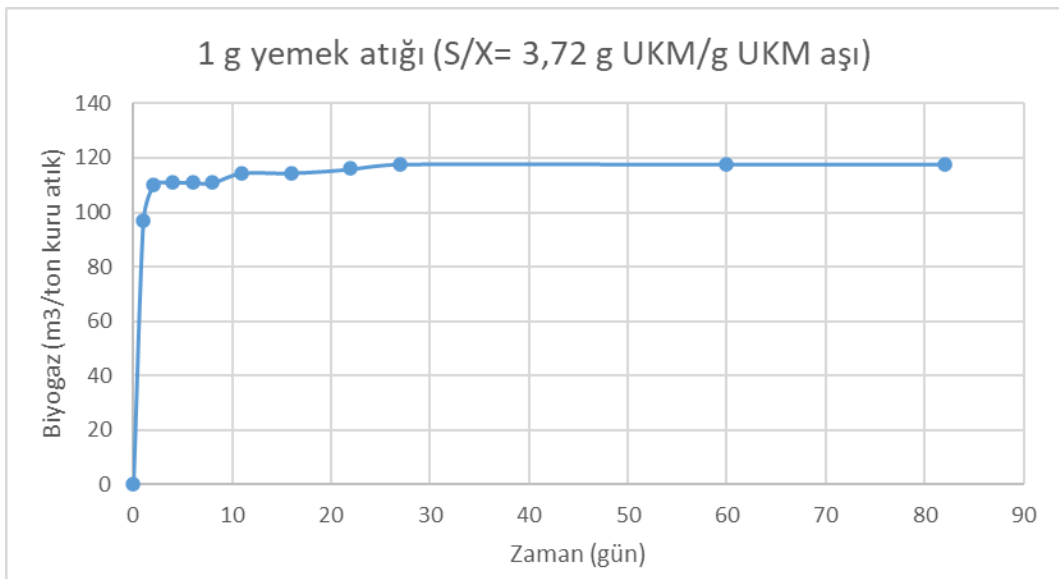
Şekil 5.1 5 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği

2 g yemek atığı ile yapılan çalışmada biyogaz üretimi aynı 5 g yemek atığı ile yapılan deneyde olduğu gibi hızla artmış (Şekil 5.2) ve yaklaşık olarak 22. günde dengeye ulaşmıştır. 82 günlük deney sonunda toplam biyogaz üretimi 89,76 m³/ton olarak tespit edilmiştir. Deney sonunda pH değeri 4,7 olarak bulunmuştur. Başlangıçtaki artış trendine ve pH'a bakılarak bu deney setine ait 7,44 g UKM/g UKM aşısı değerinin uygun olmadığı ve daha düşük bir S/X oranı ile deneylerin tekrarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.2 2 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği

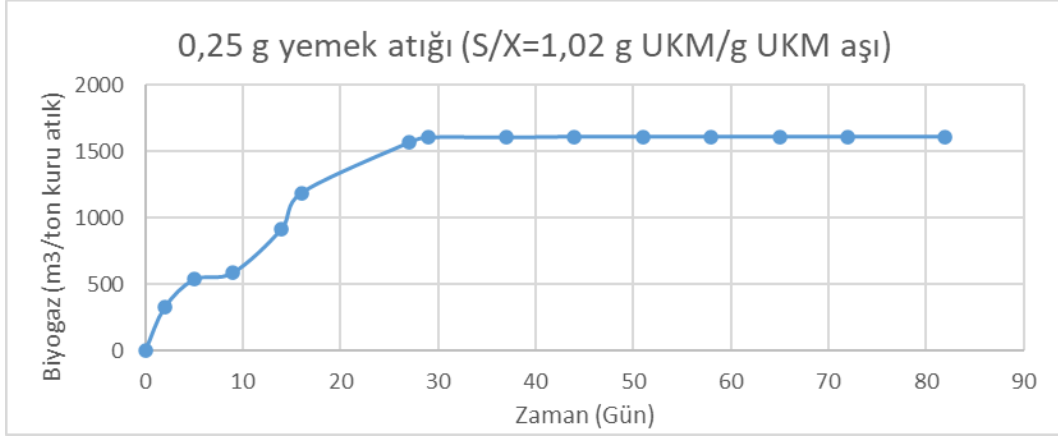
1 g yemek atığı ile yapılan çalışmada biyogaz üretimi aynı 2 ve 5 g yemek atığı ile yapılan deneylerde olduğu gibi hızla artmış (Şekil 5.3) ve yaklaşık olarak 2. günde dengeye ulaşmıştır. 82 günlük deney sonunda toplam biyogaz üretimi 117,78 m³/ton olarak tespit edilmiştir. Deney sonunda pH değeri 4,85 olarak bulunmuştur. Başlangıçtaki artış trendine ve pH'a bakılarak bu deney setine ait 3,72 g UKM/g UKM aşısı değerinin uygun olmadığı ve daha düşük bir S/X oranı ile deneylerin tekrarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.



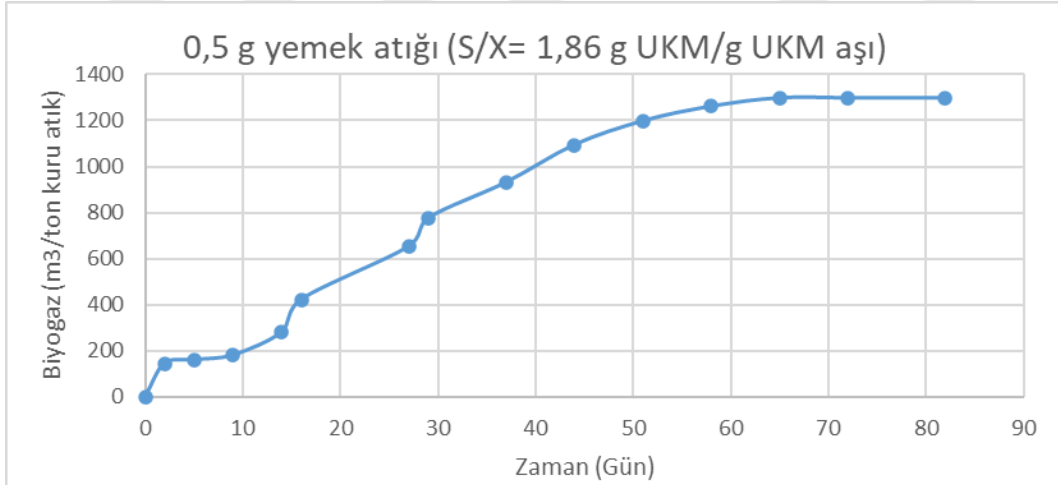
Şekil 5.3 1 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği

5.1.2.2 0,25 g, 0,5 g ve 0,75 g yemek atığına ait biyogaz üretimi sonuçları

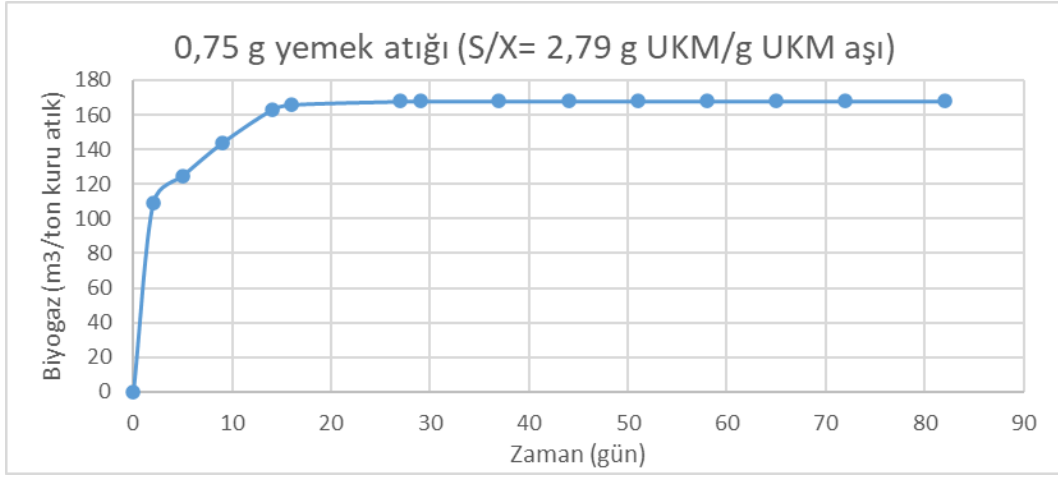
0,25 g, 0,5 g ve 0,75 g yemek atıkları kullanılarak deney setleri yeniden kurulmuştur. Buna göre 0,25 g ile gerçekleştirilen deneylerde yaklaşık olarak 29. günde dengeye ulaşılmış ve 82 günlük deney sonunda toplam biyogaz üretimi 1611,5 m³/ton olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 0,25 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği 0,5 g ile gerçekleştirilen deneylerde 82 günlük deney sonunda toplam biyogaz üretimi 1297,2 m³/ton olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.5).



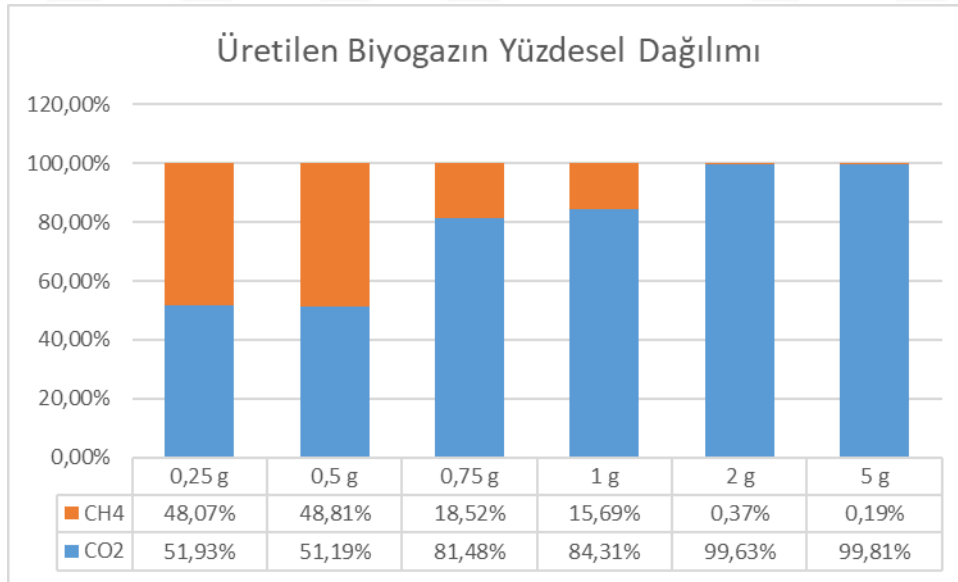
Şekil 5.5 0,5 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği 0,75 g ile gerçekleştirilen deneylerde yaklaşık olarak 16. günde dengeye ulaşılmış 82 günlük deney sonunda toplam biyogaz üretimi 167,84 m³/ton olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 0,75 g yemek atığı ile beslenen reaktöre ait biyogaz verimliliği

5.1.2.3 Reaktörlerde üretilen biyogaz bileşimleri

Reaktörlerde üretilen biyogaz bileşimleri Şekil 5.7’de verilmiştir. Buna göre en yüksek metan yüzdesi %48,81 değeriyle 0,5 g atık (1,86 g UKM/g UKM aşısı) kullanıldığında görülmüştür. İkinci en yüksek metan yüzdesi değeri ise %48,07 olarak 0,25 g atık (1,015 g UKM/g UKM aşısı) kullanıldığında elde edilmiştir. 2 g ve daha fazla atık kullanıldığı durumlarda ise neredeyse hiç metan üretim gerçekleşmemiştir.



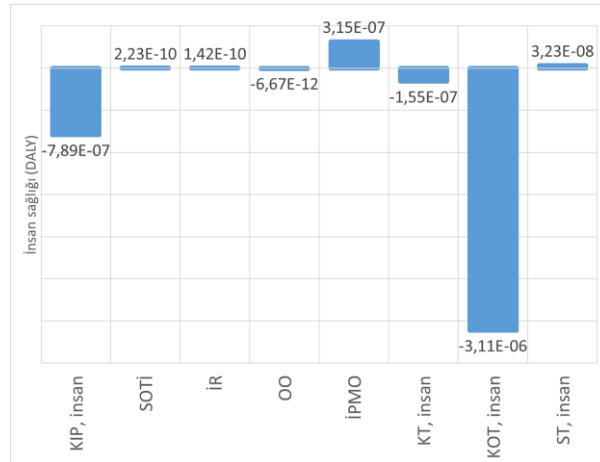
Şekil 5.7 0,25 g (1,015 g UKM/g UKM aşısı), 0,5 g (1,86 g UKM/g UKM aşısı), 0,75 g (2,79 g UKM/g UKM aşısı), 1 g (3,72 g UKM/g UKM aşısı), 2 g (7,44 g UKM/g UKM aşısı) ve 5 g (18,6 g UKM/g UKM aşısı) yemekhane atığı içeren reaktörlerde üretilen biyogazın CO₂ ve CH₄ içerikleri

5.2 Yiyecek Atıklarından Enerji Üretimi Sonucunda Açığa Çıkan Karbondioksitin MKÇ ile Tutulması Proseslerinin Çevresel Açından Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları

Atıktan enerji üretimine ek olarak kalsiyum karbonat üretimi de yapan yani bir anlamda enerji üretirken karbondioksit salınımını azaltma yönünde de çalışan bir tesis varsayımı yapılmıştır. 1 kW.saat enerji üretimin yanında 1 kg kalsiyum karbonat üretiminin de gerçekleştirildiği varsayımı ile oluşturulan senaryolarda yakma+mikrobiyal kalsit üretimi, piroliz+mikrobiyal kalsit üretimi, gazifikasyon+mikrobiyal kalsit üretimi ve biyometanizasyon+mikrobiyal kalsit üretimi senaryoları oluşturulmuştur. Kıyaslama açısından temel senaryo olarak da Türkiye'deki birçok enerji türünden karışık olarak üretilen elektrik enerjisinin 1 kW.saat üretimindeki etki ve 1 kg standart kalsiyum karbonat üretimi (Calcium carbonate, precipitated, market for calcium carbonate, precipitated, APOS) prosesinin bir arada gerçekleştiği durumun etkisi ele alınmıştır.

5.2.1 MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretiminin YDD sonuçları

Yiyecek atıklarının yakılması ile birleştirilmiş mikrobiyal kalsit çökmesine ait yaşam döngüsü etki değerlendirmesi sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir. Yakma ile birleştirilmiş mikrobiyal kalsit çökeliminde insan sağlığına etki (Şekil 5.8) bakımından en yüksek etki partiküler madde oluşumunda görülmüştür. En düşük etki ise kanserojen olmayan toksisitededir.

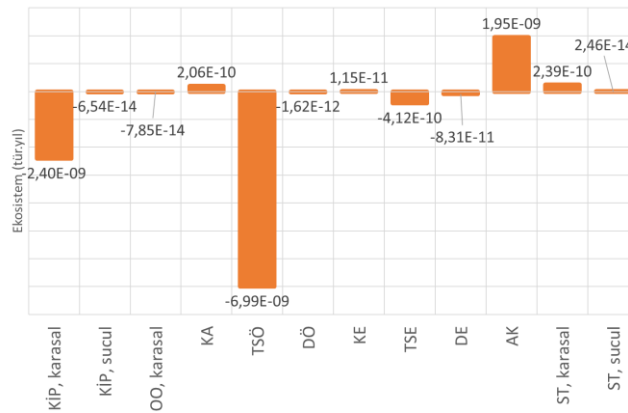


Şekil 5.8 Mikrobiyal kalsit çökeli ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

Tablo 5.3 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları

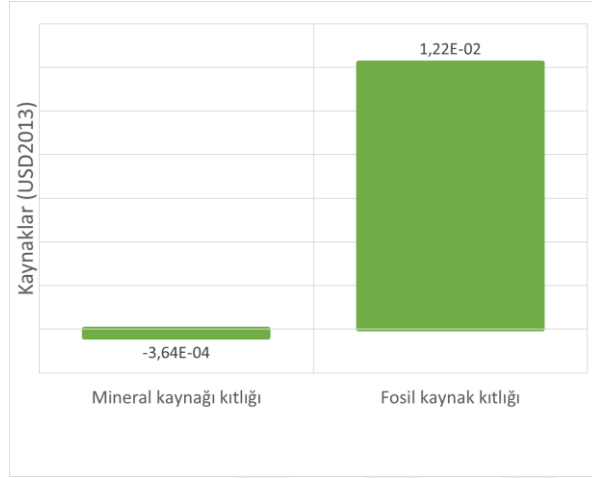
Orta nokta indikatörleri	Birim	Çevresel etki
Küresel ısınma potansiyeli	kg CO ₂ eşd.	-8,858
Stratosferik ozon tabakasının incilmesi	kg CFC11 eşd.	4,21E-07
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eşd.	0,0167
Ozon oluşumu, insan sağlığı	kg NO _x eşd.	-7,33E-06
İnce partikül madde oluşumu	kg PM _{2,5} eşd.	0,0005
Ozon oluşumu, karasal ekosistem	kg NO _x eşd.	-6,18E-07
Karasal asidifikasyon	kg SO ₂ eşd.	0,000969
Tatlı su ötrofikasyonu	kg P eşd.	-1,04E-02
Deniz ötrofikasyonu	kg N eşd.	-0,00095
Karasal ekotoksisite	kg 1,4-DCB	1,01E+00
Tatlı su ekotoksisitesi	kg 1,4-DCB	-0,596
Deniz ekotoksisitesi	kg 1,4-DCB	-7,91E-01
Kanserojen toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	-0,0465
Kanserojen olmayan toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	-1,36E+01
Arazi kullanımı	m ² a ekin eşd.	0,22
Maden kaynağı kıtlığı	kg Cu eşd.	-1,57E-03
Fosil kaynak kıtlığı	kg petrol eşd.	0,0682
Su tüketimi	m ³ /kWh	2,10E-02
Zarar değerlendirmesi		
İnsan Sağlığı	DALY	-3,71E-06
Ekosistem	tür.yıl	-7,49E-09
Kaynaklar	USD2013	1,18E-02

Ekosisteme etki (Şekil 5.9) açısından sadece yakma prosesine kıyasla mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilen sistemin arazi kullanımı etkisini artırdığı görülmektedir.



Şekil 5.9 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

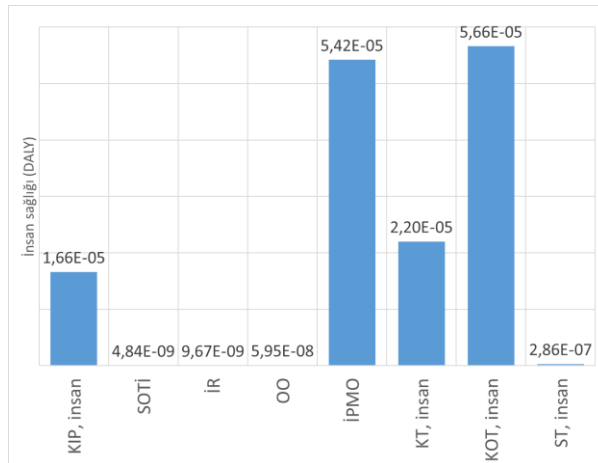
Kaynak kıtlığı (Şekil 5.10) açısından incelendiğinde, mineral kaynak kıtlığı bakımından kalsit çökmesinin eklenmesinin negatif çevresel etkiye sebep olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının yakılması ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

5.2.2 MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretiminin YDD sonuçları

Yiyecek atıklarının pirolizasyon ile enerjiye dönüştürülmesine mikrobiyal kalsit çökmesinin eklenmesi durumuna ait yaşam döngüsü etki değerlendirmesi sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir. İnsan sağlığına etki (Şekil 5.11) açısından en yüksek sonuç veren etki kategorileri sırasıyla kanserojen olmayan toksisite, ince partikül madde oluşumu, kanserojen toksisite ve küresel ısınma potansiyelidir.

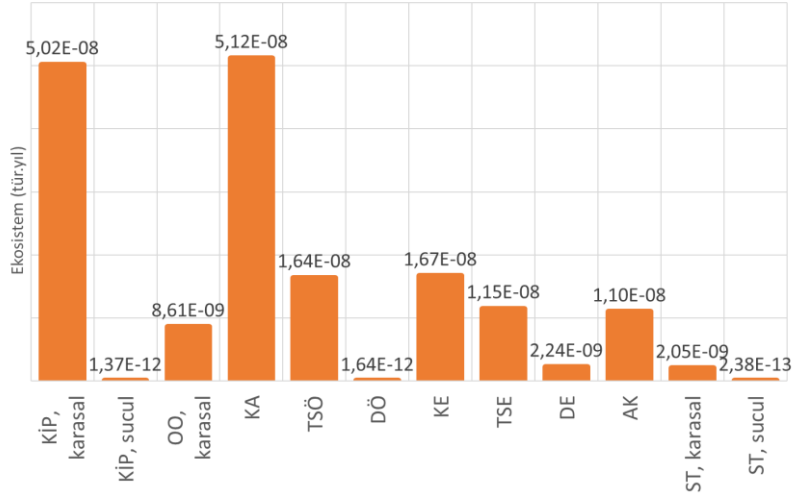


Şekil 5.11 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

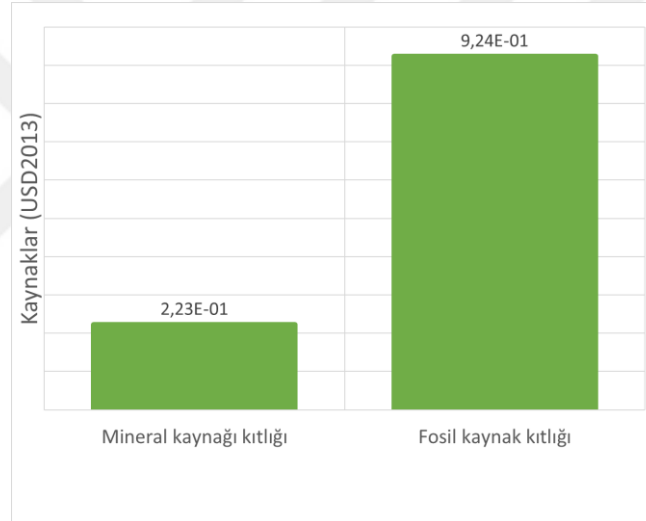
Tablo 5.4 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları

Orta nokta indikatörleri	Birim	Çevresel etki
Küresel ısınma potansiyeli	kg CO ₂ eşd.	17,9
Stratosferik ozon tabakasının incelmesi	kg CFC11 eşd.	9,12E-06
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eşd.	1,14
Ozon oluşumu, insan sağlığı	kg NO _x eşd.	0,0653
İnce partikül madde oluşumu	kg PM _{2,5} eşd.	0,0863
Ozon oluşumu, karasal ekosistem	kg NO _x eşd.	0,0667
Karasal asidifikasyon	kg SO ₂ eşd.	0,242
Tatlı su ötrofikasyonu	kg P eşd.	0,0245
Deniz ötrofikasyonu	kg N eşd.	0,000966
Karasal ekotoksosite	kg 1,4-DCB	1,46E+03
Tatlı su ekotoksitesite	kg 1,4-DCB	16,6
Deniz ekotoksitesite	kg 1,4-DCB	21,3
Kanserojen toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	6,62
Kanserojen olmayan toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	248
Arazi kullanımı	m ² a ekin eşd.	1,24
Maden kaynağı kıtlığı	kg Cu eşd.	0,963
Fosil kaynak kıtlığı	kg petrol eşd.	4,18
Su tüketimi	m ³ /kWh	0,224
Zarar değerlendirmesi		
İnsan Sağlığı	DALY	1,50E-04
Ekosistem	tür.yıl	1,70E-07
Kaynaklar	USD2013	1,15E+00

Ekosisteme olan etki (Şekil 5.12) incelendiğinde küresel ısınma potansiyelinde sadece piroliz prosesine kıyasla artış olduğu tespit edilmiştir. En yüksek etkiye sahip kategoriler küresel ısınma potansiyeli ve karasal asidifikasyondur. Bunları tatlı su ötrofikasyonu, karasal ekotoksosite, tatlı su ekotoksitesite, arazi kullanımı ve ozon oluşumu etkileri takip etmektedir. Kaynak varlığına etki (Şekil 5.13) bakımından ise fosil kaynak kıtlığı etkisi yine öndedir.



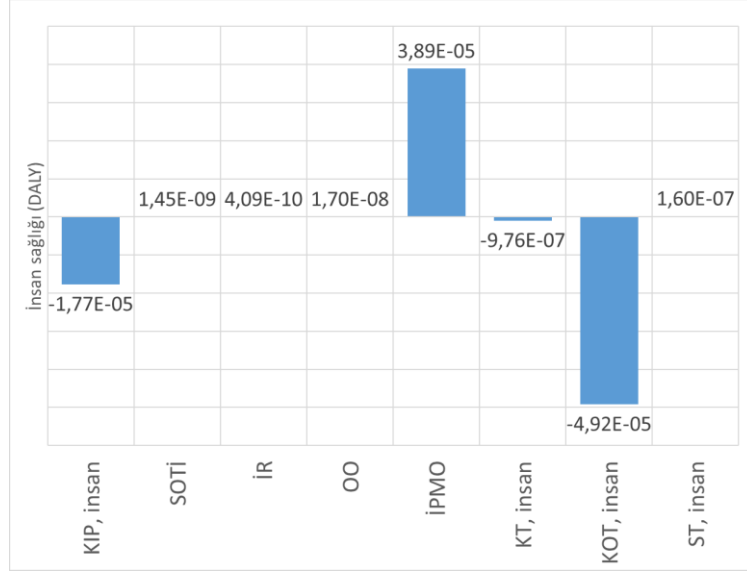
Şekil 5.12 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı



Şekil 5.13 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının pirolizi ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

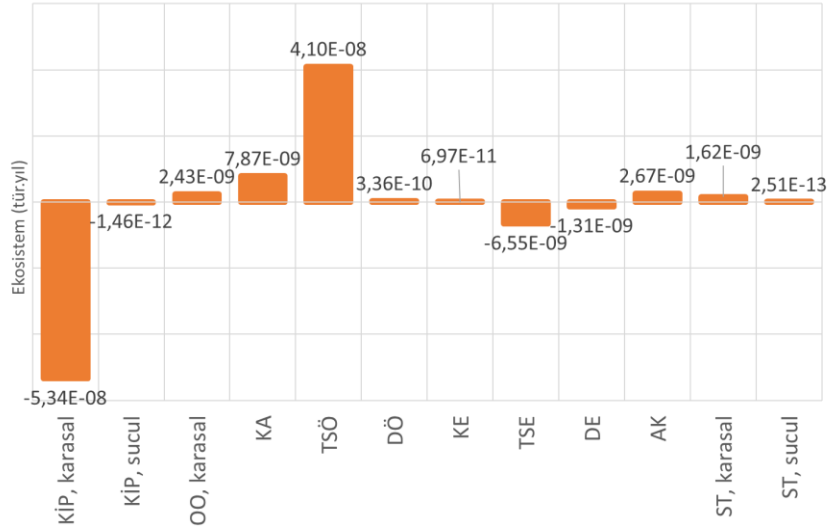
5.2.3 MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyon ile enerji üretiminin YDD sonuçları

Yiyecek atıklarının gazifikasyon ile enerjiye dönüştürülmesine mikrobiyal kalsit çökmesinin eklenmesi durumuna ait yaşam döngüsü etki değerlendirmesi sonuçları Tablo 5.5'te verilmiştir. İnsan sağlığına etki sonuçları (Şekil 5.14) incelendiğinde en büyük etkinin ince partiküler madde oluşumunda gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 5.14 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyonu ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

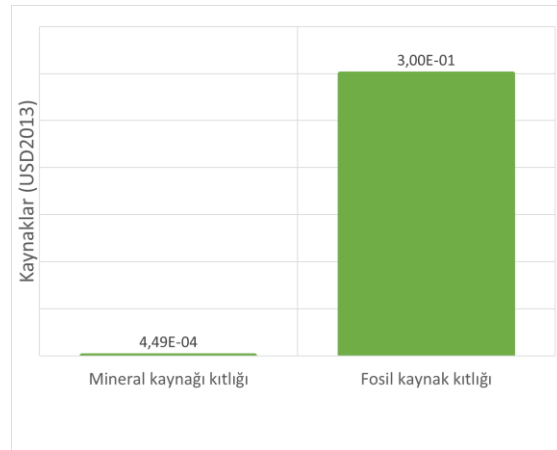
Ekosisteme etki (Şekil 5.15) üzerine olan sonuçlar ise tatlı su ekosistemi üzerine olan etkilerin diğer etkilere kıyasla daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Kaynak varlığına etki (Şekil 5.16) açısından ise en büyük etki fosil kaynak kıtlığı üzerinedir.



Şekil 5.15 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazifikasyonu ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

Tablo 5.5 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazıfıkasyon ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları

Orta nokta indikatörleri	Birim	Çevresel etki
Küresel ısınma potansiyeli	kg CO ₂ eşd.	-19,1
Stratosferik ozon tabakasının incelməsi	kg CFC11 eşd.	2,74E-06
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eşd.	0,0482
Ozon oluşumu, insan sağlığı	kg NO _x eşd.	0,0187
İnce partikül madde oluşumu	kg PM _{2,5} eşd.	0,0619
Ozon oluşumu, karasal ekosistem	kg NO _x eşd.	0,0188
Karasal asidifikasyon	kg SO ₂ eşd.	0,0371
Tatlı su ötrofikasyonu	kg P eşd.	0,061
Deniz ötrofikasyonu	kg N eşd.	0,198
Karasal ekotoksitesite	kg 1,4-DCB	6,11
Tatlı su ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	-9,47
Deniz ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	-12,5
Kanserojen toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	-0,294
Kanserojen olmayan toksisite (insan)	kg 1,4-DCB	-215
Arazi kullanımı	m ² a ekin eşd.	0,301
Maden kaynağı kıtlığı	kg Cu eşd.	0,00194
Fosil kaynak kıtlığı	kg petrol eşd.	2,07
Su tüketimi	m ³ /kWh	0,16
Zarar değerdendirmesi		
İnsan Sağlığı	DALY	-2,88E-05
Ekosistem	tür.yıl	-5,32E-09
Kaynaklar	USD2013	3,00E-01



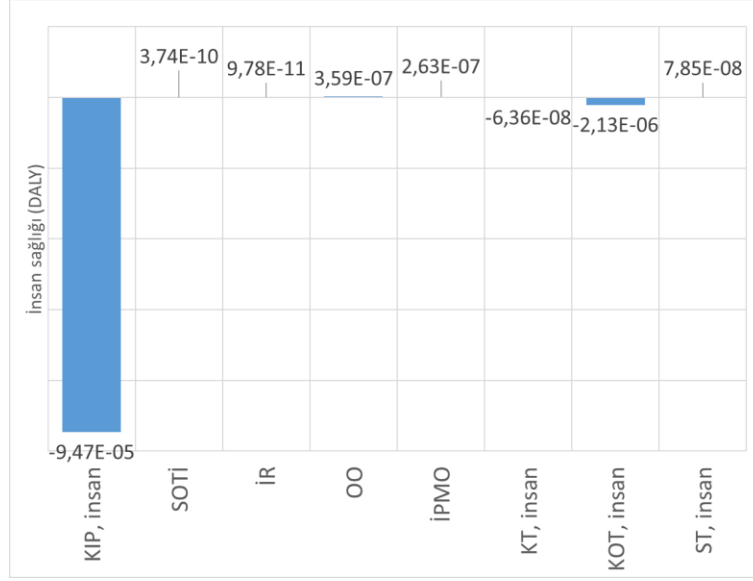
Şekil 5.16 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının gazıfıkasyonu ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

5.2.4 MKÇ ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyon ile enerji üretiminin YDD sonuçları

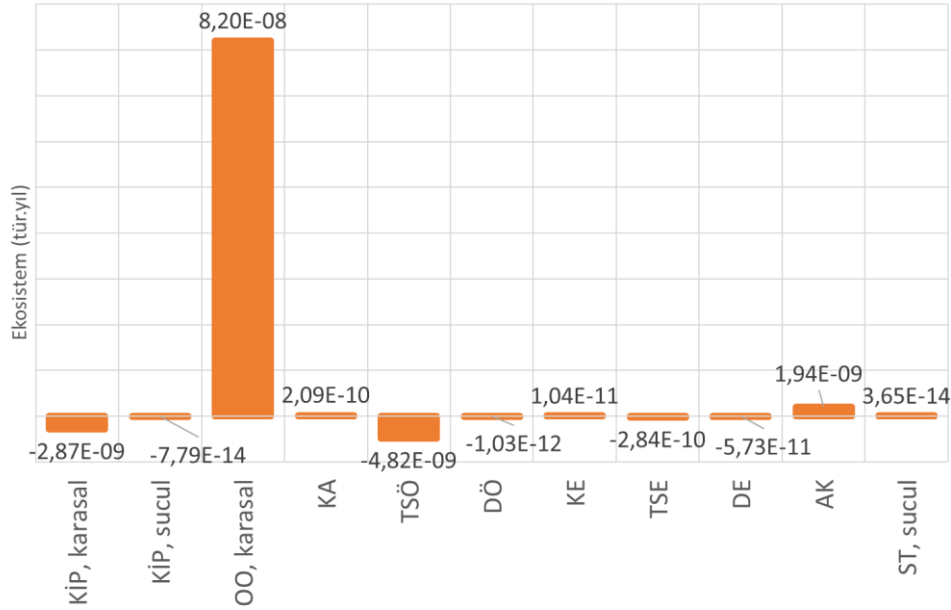
Yiyecek atıklarının biyometanizasyon ile enerjiye dönüştürülmesine mikrobiyal kalsit çökmesinin eklenmesi durumuna ait yaşam döngüsü etki değerlendirmesi sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir. İnsan sağlığına etki (Şekil 5.17) bakımından çevresel etkiler incelendiğinde küresel ısınma potansiyelinin negatif değerlere sahip olduğu görülmüştür. Ekosisteme etki (Şekil 5.18) bakımından en yüksek etkiye sahip kategori ise karasal ekosistemi etkileyen ozon oluşumudur.

Tablo 5.6 Mikrobiyal kalsit çökeli ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyon ile enerji üretimine ait orta nokta ve son nokta çevresel etki analizi sonuçları

Orta nokta indikatörleri	Birim	Çevresel etki
Küresel ısınma potansiyeli	kg CO ₂ eşd.	-1,02
Stratosferik ozon tabakasının incelmesi	kg CFC11 eşd.	7,05E-07
İyonlaştırıcı radyasyon	kBq Co-60 eşd.	0,0115
Ozon oluşumu, insan sağlığı	kg NO _x eşd.	0,394
İnce partikül madde oluşumu	kg PM _{2,5} eşd.	0,000418
Ozon oluşumu, karasal ekosistem	kg NO _x eşd.	0,636
Karasal asidifikasyon	kg SO ₂ eşd.	0,000987
Tatlı su ötrofikasyonu	kg P eşd.	-0,00717
Deniz ötrofikasyonu	kg N eşd.	-0,00061
Karasal ekotoksosite	kg 1,4-DCB	0,912
Tatlı su ekotoksitesi	kg 1,4-DCB	-0,411
Deniz ekotoksitesi	kg 1,4-DCB	-0,546
Kanserojen toksosite (insan)	kg 1,4-DCB	-0,0191
Kanserojen olmayan toksosite (insan)	kg 1,4-DCB	-9,35
Arazi kullanımı	m ² a ekin eşd.	0,219
Maden kaynağı kıtlığı	kg Cu eşd.	-0,00147
Fosil kaynak kıtlığı	kg petrol eşd.	0,0415
Su tüketimi	m ³ /kWh	0,0415
Zarar değerlendirmesi		
İnsan Sağlığı	DALY	-2,44E-06
Ekosistem	tür.yıl	7,66E-08
Kaynaklar	USD2013	6,32E-03

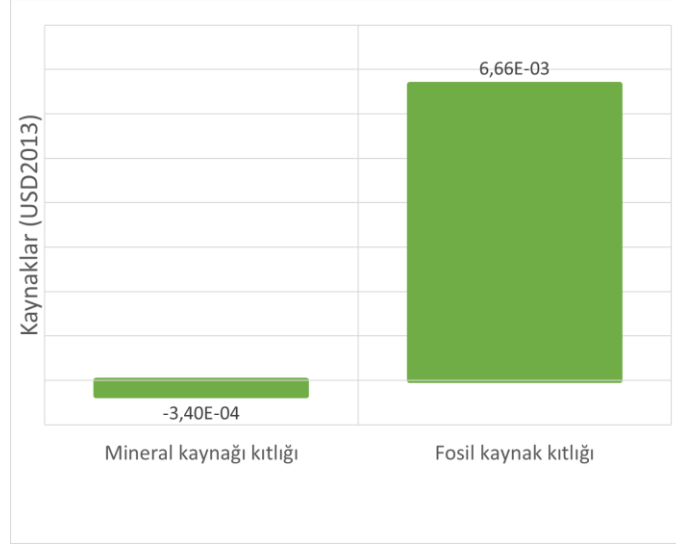


Şekil 5.17 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyonu ile enerji üretimi prosesinin insan sağlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı



Şekil 5.18 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyonu ile enerji üretimi prosesinin ekosisteme etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

Kaynak varlığına etki (Şekil 5.19) bakımından ise fosil kaynak kıtlığı en büyük etkiye sahip etki kategorisidir.

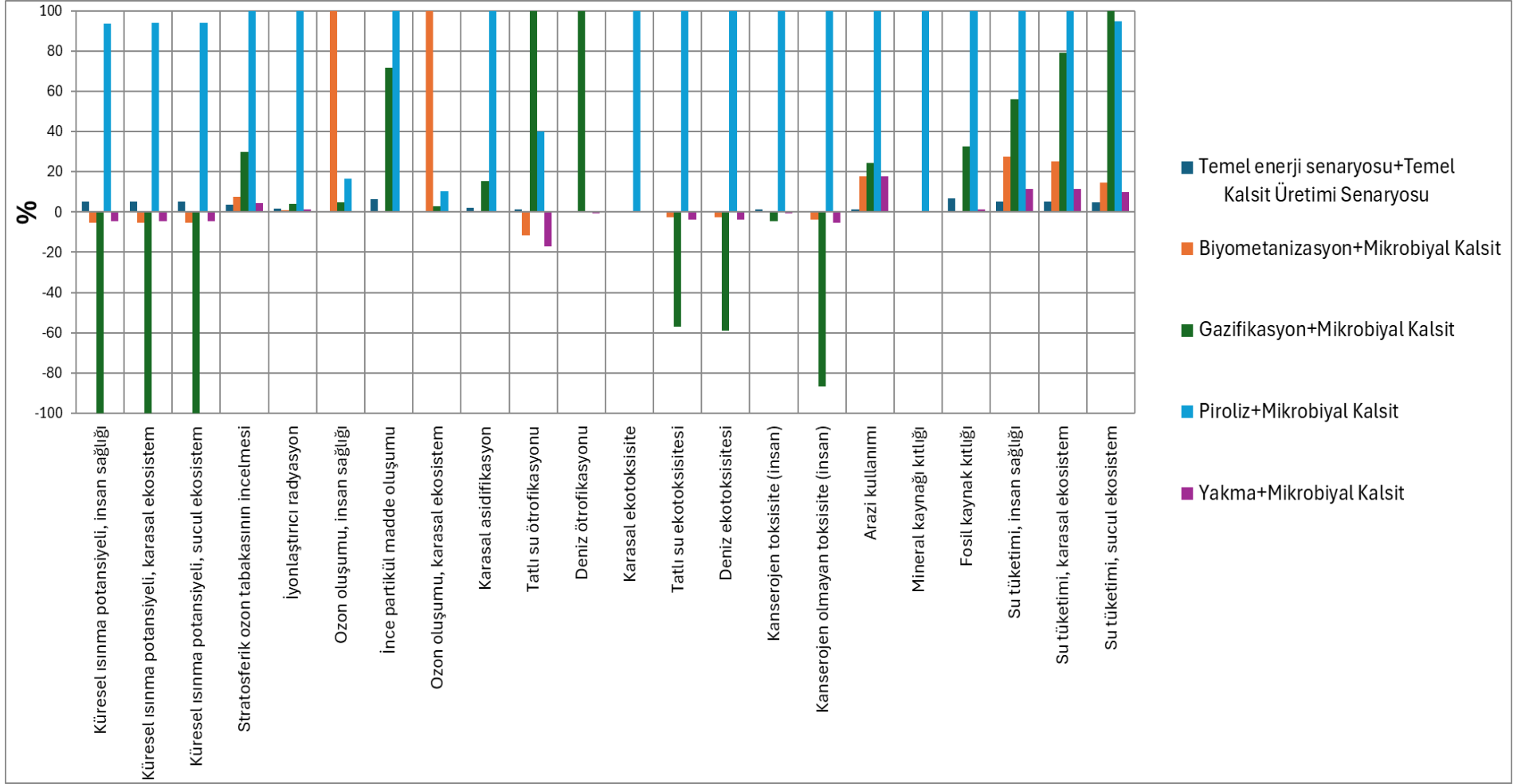


Şekil 5.19 Mikrobiyal kalsit çökelimi ile birleştirilmiş yiyecek atıklarının biyometanizasyonu ile enerji üretimi prosesinin kaynak varlığına etki eden yaşam döngüsü etki kategorilerinin dağılımı

5.2.5 Atıktan enerji üretimi stratejileriyle birleştirilmiş MKÇ prosesinin YDD sonuçlarının temel senaryo ile kıyaslanması

Temel senaryo olarak ülkemize ait karışık enerji üretimi (fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji) prosesinin 1 kW saat enerji ürettiği durum ile 1 kg kalsit minerali çıkarılması prosesi bir arada ele alınmıştır. Tüm senaryoların kıyaslandığı karakterizasyon sonuçları Şekil 5.20’de verilmiştir. Buna göre temel senaryo diğer senaryolara kıyasla en düşük çevresel etkiye sahiptir. Ancak fosil kaynak kıtlığı açısından yakma+mikrobiyal kalsit ve biyometanizasyon+mikrobiyal kalsit proseslerinden daha yüksek etkiye sahiptir. Mikrobiyal kalsit prosesinin yiyecek atıklarından enerji üretimine eklenmesi sonucunda sadece enerji üretim sonuçlarının çevresel etkilerinin neredeyse tamamında artış gözlenmiştir. Tüm senaryolarda küresel ısınma potansiyeli bakımından en olumlu proses gazifikasyon ve mikrobiyal kalsit çökeliminin birleştirildiği senaryo iken, en olumsuz etkiye sahip senaryo piroliz ve mikrobiyal kalsit çökeliminin birleştirildiği senaryodur.

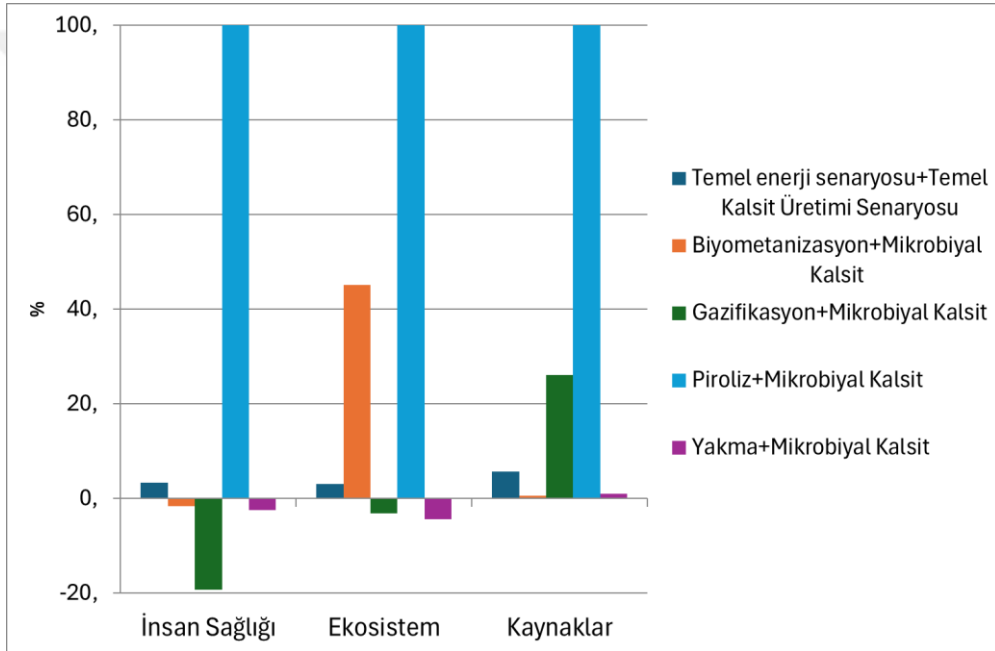
Çevresel zarar değerlendirmesi sonuçlarına (Şekil 5.21) göre, insan sağlığına zarar açısından prosesler sıralanırsa; piroliz+mikrobiyal kalsit > temel enerji+temel kalsit > biyometanizasyon+mikrobiyal kalsit > yakma+mikrobiyal kalsit > gazifikasyon+mikrobiyal kalsit, olduğu görülür.



Şekil 5.20 1 kW.saat enerji ve 1 kg CaCO₃ üretimi yapan farklı senaryoların çevresel etki değerlendirme karakterizasyon sonuçları

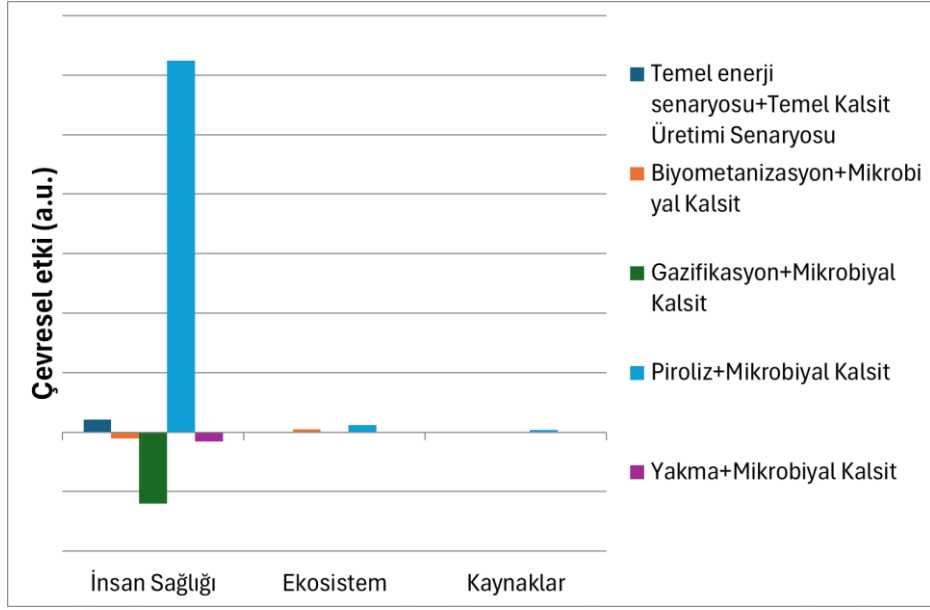
Ekosisteme zarar açısından ise en olumsuz proses piroliz+mikrobiyal kalsit iken, ikinci olumsuz proses biyometanizasyon+mikrobiyal kalsit'tir. Bunu temel senaryo takip etmektedir. Gazifikasyon ve yakmanın mikrobiyal kalsit çökelişi ile birleştirildiği senaryolarda ise çevresel etki bakımından olumlu sonuçlar elde edilmektedir.

Kaynak üzerine etki bakımından en olumsuz sonuç veren senaryo piroliz+mikrobiyal kalsit'tir. İkinci ve üçüncü olumsuz senaryolar ise sırasıyla gazifikasyon+mikrobiyal kalsit ve temel senaryolardır. Biyometanizasyon ve yakmanın mikrobiyal kalsit ile birleştirildiği senaryolar ise kaynaklara etki bakımından en düşük olumsuz etkiye sahiptir.

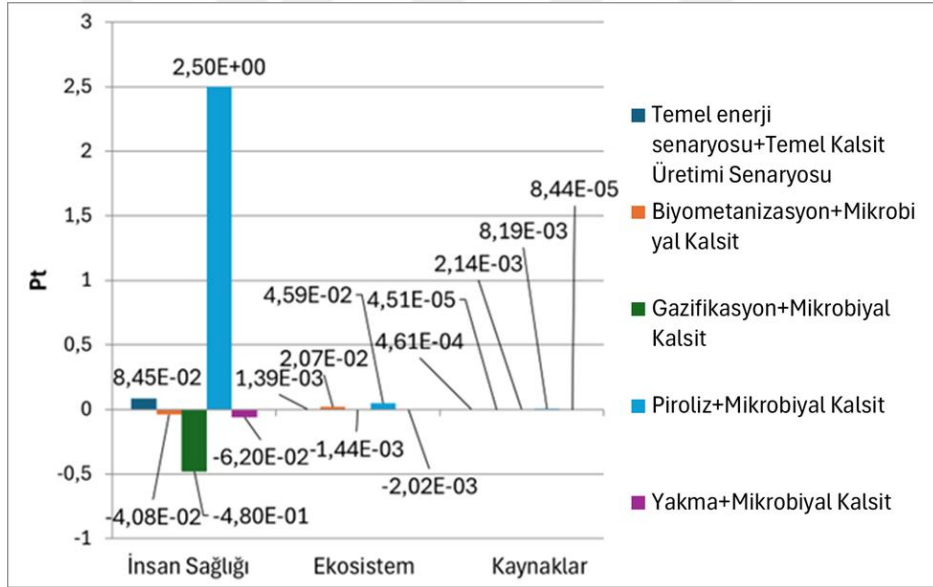


Şekil 5.21 Yiyecek atıklarının enerji eldesine ait son nokta zarar değerlendirme sonuçları

Normalizasyon (Şekil 5.22) ve ağırlıklandırma (Şekil 5.23) sonuçlarına göre insan sağlığına etki çevresel etkiler arasında en fazla etkiye sahiptir. Prosesler en olumlu prosesten en olumsuz prosese doğru sıralanırsa; gazifikasyon+mikrobiyal kalsit, yakma+mikrobiyal kalsit, biyometanizasyon+mikrobiyal kalsit, temel enerji+temel kalsit ve son olarak da en olumsuz proses olan piroliz+mikrobiyal kalsit prosesi bulunmuştur.



Şekil 5.22 Yiyecek atıklarından enerji eldesine ait yaşam döngüsü değerlendirme normalizasyon sonuçları



Şekil 5.23 Yiyecek atıklarından enerji eldesine ait yaşam döngüsü değerlendirme ağırlıklandırma sonuçları

6.1 Bulgular

Bu çalışmada, traverten türü su kaynaklarından alınarak zenginleştirilen yerel bakteri toplulukları tarafından katalizlenen mikrobiyal kalsit çökmesi prosesinin yiyecek atıklarından enerji üretimi stratejileri ile entegrasyon potansiyeli incelenmiştir. Çalışmalarda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmektedir;

1. Travertenler kalsiyum karbonat birikimi ile karakterize edilen benzersiz jeolojik oluşumlar olup, biyomineralizasyon sürecini katalize edebilen çeşitli mikrobiyal topluluklar için ideal yaşam alanları sağlamaktadırlar. Bu çalışma için Denizli’de bulunan 3 ayrı traverten tipi su kaynağından bakteri ve su numuneleri alınmış ve mikrobiyal kalsit çökelişi mekanizmalarından üreaz mekanizmasına sahip olan türlerin tespiti için farklı besiyerlerinde zenginleştirilmiş bu türlere üreaz aktivitesi testi gerçekleştirilmiştir. Üreaz aktivitesi testi her üç kaynaktan da (Pamukkale Traverten Su Kaynağı, Pamukkale Traverten Havuzları ve Karahayıt Kırmızı Su Travertenleri) üreaz aktivitesinin varlığını ortaya koymuştur. Ancak zenginleştirme yapılan besiyerine bağlı olarak üreaz aktivitesinin baskınlığı değişmektedir. Zenginleştirme amaçlı kullanılan 3 ayrı besiyerinden en iyi sonuç veren besiyeri ATCC1832 isimli besiyeri olarak bulunmuştur. Üreaz aktivitesinin zamana bağlı kantitatif analizi sonucunda en yüksek üreaz aktivitesi profiline sahip örnekler ATCC1832’de zenginleştirilen Pamukkale Traverten Su Kaynağı ve Pamukkale Traverten Havuzu olarak bulunmuştur.
2. Üreaz aktivitesi en yüksek olarak tespit edilen iki numune (Pamukkale Traverten Su Kaynağı ve Pamukkale Traverten Havuzu) için Metagenom analizleri gerçekleştirilmiştir. Metagenom analiz sonuçlarına göre Pamukkale Traverten kaynağından alınarak ATCC1832 besiyerinde zenginleştirilmiş olan numunelerde filum seviyesi için %99,11 Proteobacter ve %0,89 Firmicutes bulunmaktadır. Pamukkale Traverten Havuzundan alınarak yapılan zenginleştirmede ise %99,57 Firmicutes varlığı ve %0,43 Proteobakteri belirlenmiştir.

3. Mikrobiyal kalsit çökmesi amacıyla kalsiyum içeren besiyerinde 72 saat ve 120 saat olmak üzere farklı sürelerde çoğaltma yapılmış ve elde edilen çökelekler inkübasyon süresi sonunda santrifüjlenerek yıkanmış ve kurutularak XRD, SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM sonuçları incelendiğinde özellikle Pamukkale Travertenlerine ait 72 saatlik çoğaltmada bakteriyel izlere sahip vaterit tipi kalsiyum karbonat kristallerinin varlığı tespit edilmiştir. Tüm numunelerde kalsiyum karbonat kristalleri görülmekte olup, vateritin yanında kalsit kristalleri de görülmüştür. EDS ve XRD sonuçları da bu bulguları doğrular niteliktedir. XRD sonuçlarına göre inkübasyon süresinin artışının vaterit tipi kalsiyum karbonat kristallerinin kalsit tipi kalsiyum karbonat kristallerine dönüşmesine neden olduğu bulunmuştur. Bu bulgular literatür verileri ile de doğrulanmıştır.
4. Mikrobiyal kalsit çökelişi için yapılan çalışmalar mineral bakımından zengin kaynak sularının kalsiyum karbonat biriktirmesiyle oluşan traverten yapılarının, mikrobiyal kalsit çökmesi için bakteri kaynağı oluşturması açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
5. Yiyecek atıklarından enerji eldesinde termokimyasal yöntemler arasında yakma, piroliz, gazifikasyon metodları seçilirken, bunların yanısıra biyometanizasyon yöntemi de değerlendirmeye alınmıştır. Bu amaçla temsil edicilik açısında 6 ay süre ile toplanan yiyecek atıkları için nem, uçucu katı madde, toplam karbon, toplam azot, toplam kükürt, üst ısı değeri analizleri gerçekleştirilmiştir. Toplanan atıkların fizikokimyasal analiz sonuçlarının literatür değerleri ile tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Toplanan kurutulmuş ve toz haline getirilmiş yiyecek atıkları kullanılarak biyometanizasyon potansiyeli testi gerçekleştirilmiştir. Farklı S/X oranları ile gerçekleştirilen bu çalışmalarda en iyi biyometanizasyon verimi 0,25g atık eklenen 1,02 S/X oranında gerçekleşmiştir ve biyogaz üretimi 1611,48 m³/ton atık olarak bulunmuştur.
6. Matematiksel olarak ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çöktürmesi ve atıktan enerji üretimi proseslerine MKÇ'nin eklenmesi durumlarının çevresel etkilerinin incelenmesi için ayrı ayrı yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Toplanan envanter verilerinin analizi SimaPro 9.4.0.3 ve ReCiPe 2016 metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Matematiksel olarak ölçeklenen mikrobiyal kalsit çökmesi prosesi

Ecoinvent veritabanında halihazır olarak yer alan “standart kalsiyum karbonat minerali ekstraksiyonu (Calcium carbonate, precipitated, market for calcium carbonate, precipitated, APOS)” prosesine ait çevresel etkiler ile 1 kg CaCO₃ üretimi baz alınarak kıyaslanmış ve ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökmesinin çevresel etkileri standart üretim prosesinden daha fazla bulunmuştur.

7. Mikrobiyal kalsit çökmesi ile birleştirilmiş atıktan enerji üretimi proseslerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi için senaryolar;

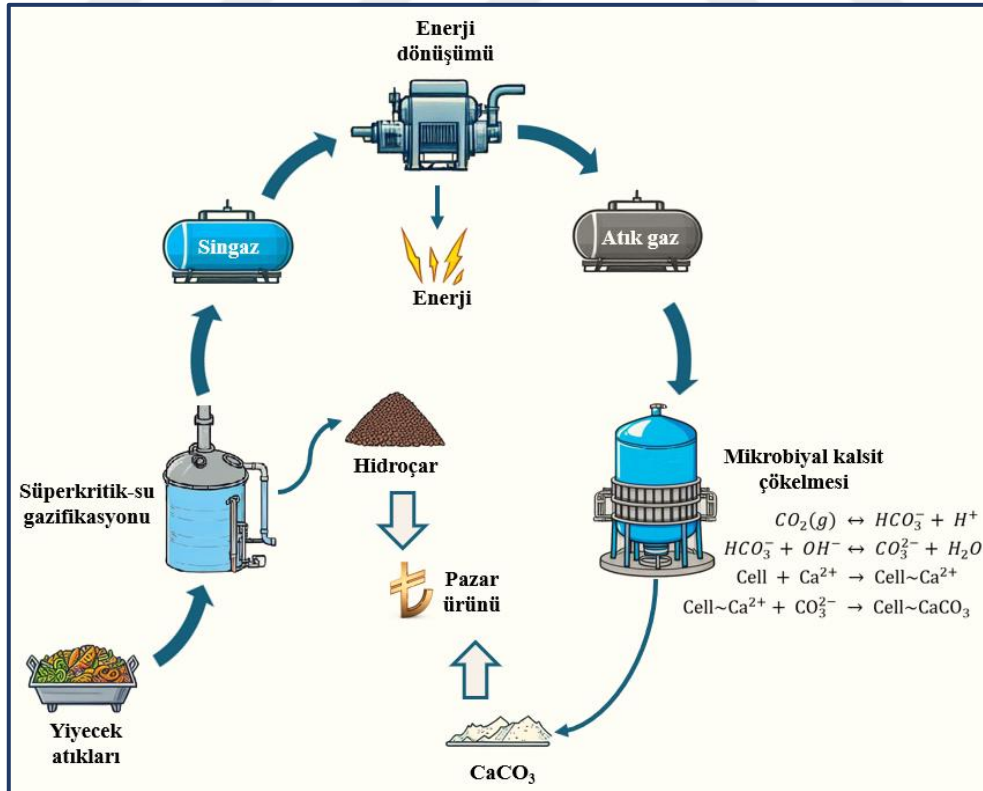
- Türkiye’deki 1 kW.saat elektrik enerjisi üretimi ve 1 kg CaCO₃ üretimi için standart kalsit minerali ekstraksiyonu prosesi
- Yiyecek atıklarının yakılarak 1 kW.saat enerji üretilmesi ve ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökmesi prosesi ile 1 kg CaCO₃ üretimi
- Yiyecek atıklarının pirolizi ile 1 kW.saat enerji üretilmesi ve ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökmesi prosesi ile 1 kg CaCO₃ üretimi
- Yiyecek atıklarının gazifikasyonu 1 kW.saat enerji üretilmesi ve ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökmesi prosesi ile 1 kg CaCO₃ üretimi
- Yiyecek atıklarının biyometanizasyonu ile 1 kW.saat enerji üretilmesi ve ölçeklendirilmiş mikrobiyal kalsit çökmesi prosesi ile 1 kg CaCO₃ üretimi, olarak belirlenmiştir.

Prosesler en olumlu prostesten en olumsuz prosese doğru sıralanırsa; “piroliz+mikrobiyal kalsit > temel enerji+temel kalsit > biyometanizasyon+mikrobiyal kalsit > yakma +mikrobiyal kalsit > gazifikasyon+mikrobiyal kalsit” sonucu elde edilmektedir. Bu durumun ana sebeplerinden biri yiyecek atıklarının pirolizi ile üretilen enerji miktarının diğer proseslere kıyasla daha düşük olması ve 1 kW.saat enerji üretebilmek için diğer yöntemlere kıyasla daha fazla kaynak harcanmasının gerekmesidir.

6.2 Öneriler

Çalışmalar sonunda elde edilen bulgulardan yola çıkılarak yapılan öneriler aşağıdaki gibidir;

1. Yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları sonucunda kullanılan besiyerinden kaynaklanan çevresel etkilerin oldukça baskın olduğu tespit edilmiştir. Mikrobiyal kalsit çökmesinin gerçek ölçekli uygulamalarda çevresel etkilerinin minimize edilebilmesi için daha az çevresel etkiye sahip besiyerlerinin kullanılması ve sistem optimizasyonu önerilmektedir.
2. Yaşam döngüsü analizi sonuçlarına göre önerilen sisteme ait sistem şeması Şekil 6.1’de verilmiştir. Görülebileceği üzere sistem yiyecek atıklarının süper-kritik-su gazifikasyonu metodu ile singaza çevrilmesini, bu singazın enerjiye dönüştürülmesini içermekle birlikte, açığa çıkan atık gazların mikrobiyal kalsiyum karbonat çöktürmesi sistemine beslenmesi ve kalsiyum karbonat elde edilmesini içermektedir. Bu sistemde pazar değerine sahip hidroçar ve kalsiyum karbonat üretiminin yanısıra enerji üretimi de gerçekleşmektedir.



Şekil 6.1 Mikrobiyal kalsit çökelişi ile entegre yiyecek atıklarından enerji dönüşümü sistemi için önerilen döngüsel ekonomi yaklaşımı

3. Tez çalışması kapsamında Denizli’de yer alan 3 su kaynağından numune alınmış ve bu üç kaynağın tamamında mikrobiyal kalsit çökelimi yapabilen üreaz aktif mikroorganizmaların bulunduğu tespit edilmiştir. Ancak Türkiye’de traverten türü ve sarkıt/dikit oluşturabilen birçok karstik mağara yapısı bulunmaktadır. Gelecekte Türkiye genelinde traverten ve karstik türden coğrafik oluşumların, mikrobiyal kalsit çökelimi yapan türler açısından daha detaylı çalışmalara tabi tutulması önerilmektedir.

6.3 Çalışmanın Potansiyel Alternatif Kullanım Stratejileri

Traverten oluşumlarında bakteri ve mineraller arasındaki etkileşim dinamiklerini anlamak, buralardan zenginleştirilecek mikrobiyal türlerin; biyomineralizasyon çalışmaları, karbon yakalama ve sürdürülebilir malzeme geliştirme gibi uygulamalardaki potansiyellerini en etkin biçimde kullanabilmek açısından önem taşır. Bu tez çalışması her ne kadar yiyecek atıklarının enerjiye dönüşümü esnasında ortaya çıkan karbondioksitin tutulması hedefi üzerine kurgulandıysa da, tez çalışması kapsamında zenginleştirilen mikrobiyal kalsit çökelimi yapabilen mikroorganizmaların, karbon tutma dışında çeşitli farklı çalışmalarda kullanım potansiyeli de bulunmaktadır. Tezin bu kısmında mikrobiyal kalsit çökelimi amacıyla Denizli’de yer alan çeşitli traverten türü su kaynaklarından zenginleştirilen bakterilerin diğer potansiyel kullanım alanları anlatılacaktır.

6.3.1 Ağır metal giderimi

Mikrobiyal kalsit çökelimi yapan türler kalsiyum karbonat üretimin yanı sıra +2 yüklü iyonların giderimi konusunda da etkilidir. Literatürde CaCO_3 çökmesi ile aynı ortamda Pb^{2+} iyonlarının bulunduğu koşullarda Pb^{2+} ’nın Ca^{2+} ’nın yerini alma eğilimi gösterdiği ve çökelmeye başlayan kalsiyum karbonatın yeniden suda çözünerek PbCO_3 oluşumunun gerçekleştiği belirlenmiştir [122]. Ayrıca bu durumun bakır, demir(II), çinko, kadmiyum gibi diğer iki değerlikli katyonlar için de tamamen aynı olduğu ve metal karbonatların çökmesinin gerçekleştiği bilinmektedir [123]. Literatürde stronsiyumun katı fazda SrCO_3 olarak çöktürülmesi için de kullanımı çalışılmıştır [124]. Burada sayılmayan diğer +2 değerlikli iyonlar olan berilyum, magnezyum, baryum, kobalt, mangan, civa, nikel ve kalay elementleri +2 değerlik alabilme özellikleri nedeniyle bunların da karbonatlı bileşikleri oluşabilir. Dolayısıyla mikrobiyal kalsit çökeliminin

katalizleyici etkisi sayesinde bu türde +2 iyonların bulunduğu su ortamlarında sadece kalsiyum karbonat çökelişi değil aynı zamanda diğer +2 yüklü iyonların tek karbonatlı ve dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ile ankerit ($\text{Ca}(\text{Fe}^{++}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$) benzeri çoklu karbonatlı bileşiklerinin de meydana gelebileceği ihtimal dahilindedir. Mikrobiyal kalsit çökelişi her ne kadar biyolojik olarak katalizlenme ile başlayan bir süreç olsa da ileriki aşamalarda diğer iyonların ortamdaki varlığı fizikokimyasal dönüşüm süreçlerinin de dahil ile farklı karbonatlı bileşiklerin oluşumuna yol açabilir. Tez çalışması kapsamında zenginleştirilen yerel türlerin su ortamında +2 yüklü ağır metallerin amacıyla kullanım potansiyeli olduğu düşünülmektedir.

6.3.2 Toprak stabilizasyonu

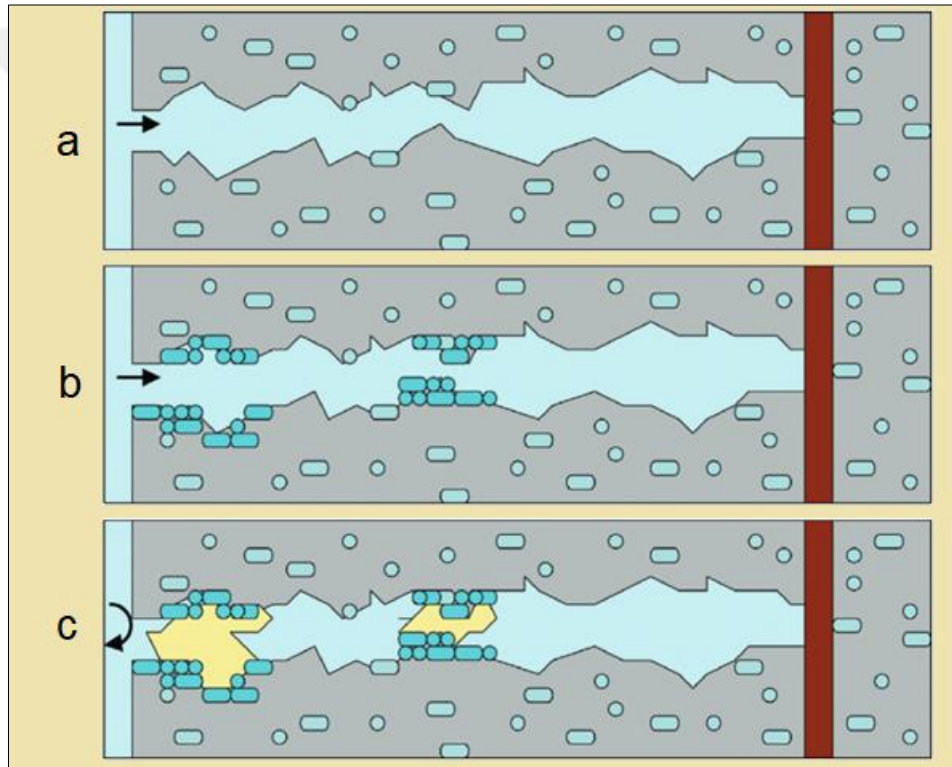
Mikrobiyal kalsit çökelişinin toprak, kum gibi medyalarda uygulanması sayesinde boşluklar arasında oluşacak kalsiyum karbonat ve benzer karbonatlı bileşikler vasıtasıyla toprak stabilizasyonu da yapılabilmektedir [21], [125], [126]. Literatürde farklı mikrobiyal türler toprak geçirgenliğini azaltmak amacıyla por hacminin düşürülmesi veya tamamen porların bloke edilmesi amacıyla kullanılmış [127], bu sayede toprak güçlendirmesi ile birlikte erozyon kontrolü de yapılabilmektedir [128]. Bu amaçla literatürde kum/toprak [21], [125], [129], çakıl-kum karışımları [130] gibi uygulamaların yanı sıra; kömür [131], bakır [132], demir [133], boksit [134], pirit [59] ve uranyum [135] içerikli maden işleme sahalarının stabilizasyonu amacıyla çalışmalar da bulunmaktadır. Dolayısıyla tez kapsamında zenginleştirilen mikrobiyal kalsit çökelişi yapabilen yerel türlerin toprak stabilizasyonu ve maden sahalarının iyileştirilmesi amacıyla kullanım potansiyelinin de bulunduğu söylenebilir.

6.3.3 Tarihi eserlerin, yapıların ve fosillerin restorasyonu

Mikrobiyal kalsit çökelişi, aynı zamanda tarihi yapıların [136] ve fosillerin restorasyonunda [137] da kullanılabilmektedir. Bu mikrobiyal olarak katalizlenen kalsit oluşumu süreci sayesinde zamanla oluşan çatlakların ve yapıdaki porların içerisinde kalsit kristalleri meydana getirir ve zamanla aşınan yüzeylerin eski formuna kavuşmasını sağlar. Restorasyon çalışmalarında mikrobiyal kalsit çökelişi, eserlerin bozulmuş bölgelerini onarmak [138], [139], [140] ve yapıların dayanıklılığını artırmak için kullanılabilir.

6.3.4 Çimentolaştırma ve kendi kendini iyileştiren yapı malzemesi

Mikrobiyal kalsit çökeltiminin beton yapılarının iyileştirilmesi amacıyla da kullanılabildiği bilinmektedir [43], [46], [55]. Özellikle beton yapılarının iyileştirilmesi amacıyla betondaki çatlaklara enjeksiyon, çatlak yüzeyine püskürtme veya beton yapılarının oluşturulması aşamasında beton harcı içerisine bakteri katkısı ile beton iyileştirilmesi yapılabilmektedir [141]. Betonun harcının karılması esnasında bakteri katkısı sayesinde oluşan yapı malzemesine biyo-beton ya da diğer adıyla kendi kendini iyileştirebilen beton (self-healing concrete) adı verilmektedir [142]. Mikrobiyal katkılı betonun kendini iyileştirme aşamaları Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Beton boşluklarının mikrobiyal kalsit çökeltimi ile onarımına ait şematik gösterim; a) oluşan çatlak, b) mikrobiyal kalsit çökeltimi yapabilen bakterilerin çatlakta çoğalması, c) mikrobiyal kalsit çökeltimi ile oluşan kalsiyum karbonatın çatlakları birleştirmesi [143].

Bakterilerin biyo-beton amacıyla çimento harcına eklenmesi aşamasında ise bakterilerin doğrudan ilavesi veya koruyucu bir malzeme ile enkapsülasyonu ile ilavesi olarak iki farklı strateji izlenilmektedir [142]. Enkapsülasyon, beton harcının pH değerlerinin oldukça yüksek olmasından ve pH değerlerini tolere edemeyen bakteri türlerinin büyük bir çoğunluğunun harç içerisine ilave edildiği

anda inhibisyon veya ölümleri nedeniyle istenilen iyileştirme potansiyelinin gerçekleşememe ihtimalinden yola çıkılarak bir önlem mekanizması olarak ortaya çıkmıştır. Bakterilerin ortam koşullarından etkilenmesini azaltabilmek adına bakterilerin biyo-uyumlu çeşitli maddeler ile enkapsülasyonu uygulamaları gerçekleştirilmektedir [144].

Mikrobiyal kalsit çökelyiminin yapı malzemelerinde kullanımına dair literatür çalışmalarından örnekler ve bu çalışmalar için kullanılan mikrobiyal türler Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Mikrobiyal kalsit çökelymesinin yapı malzemelerinde kullanımı ve bu çalışmalarda kullanılan bakteriyel türler

Kullanım Amacı	Bakteri türü	Referans
Çatlakların onarımı	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	[145]
Çatlakların onarımı	<i>Bacillus sphericus</i>	[146]
Çatlakların onarımı	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	[147]
Çimentonun sertliğinin artırılması	<i>Shewanella sp.</i>	[148]
Sürdürülebilir harç malzemesi üretimi	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	[149]
Kendi-kendini iyileştirebilen beton üretimi	<i>Bacillus pseudofirmus</i> , <i>Sporosarcina pasteurii</i>	[143]
Kendi-kendini iyileştirebilen beton üretimi	<i>Bacillus pseudofirmus</i> , <i>Bacillus cohnii</i>	[150]
Biyolojik olarak çimentolaştırma	<i>Sporosarcina pasteurii</i> , <i>Proteus vulgaris</i>	[151]
Kum kolonunun biyolojik olarak çimentolaştırılması	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	[50]

Literatürde bu alanda yapılan çalışmalarda karışık kültürlerden ziyade tek tür bakterilerin kullanımı yaygındır. Bu anlamda zenginleştirilen yerel karışık kültürün bu tür çalışmalarda kullanımı literatür açısından yenilikçi bir yöne de sahip olacaktır. Tez kapsamında zenginleştirilen mikrobiyal kalsit çökelyimi yapabilen yerel türlerin kendi kendini iyileştirebilen beton yapıları için beton harcına katkı malzemesi amacıyla ilavesi ile çimento ve yapı malzemesi sektöründe kullanılabılme potansiyelinin bulunduğu söylenebilir.

6.4 Sonuçlar ve çalışmanın Kazanımları

Tezin başlangıcında oluşturulan beş ana araştırma sorusunun (Bölüm 1.3) tez sonunda değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

1. Kalsit üretiminin kendiliğinden gerçekleştiği, düşük mikrobiyal tür sayısı ile içme suyu karakteriştiği sergileyen doğal bir kaynaktan alınan kültürler mikrobiyal kalsit çkelmesinde kullanılmak üzere zenginleştirilebilmiştir. Gelecekte de yeni ve daha verimli türlerin keşifleri için farklı su ortamlarından zenginleştirme çalışmaların devam ettirilmesi önemlidir. Denizli çevresinde mikrobiyal kalsit çökelimi yapan yeni türlerin keşfedilmesi için oldukça fazla traverten türü yapı ve karstik mağara bulunmaktadır. Bunlar arasından halk arasında ‘Yer altındaki Pamukkale’ olarak da bilinen Karlık Mağarası, içerisinde küçük traverten havuzları ve kalsit birikimi gerçekleştiği için özellikle dikkat çekmektedir. Bu manada sadece yüzey üstündeki yapılar değil aynı zamanda da karstik mağaralarda da MK çökelimi yapan türler için araştırmaların devam ettirilmesi yeni ve daha yüksek verime sahip türlerin keşfi açısından oldukça önemli olacaktır.
2. CO₂’nin hammadde olarak kullanıldığı MK prosesinde faydalı ürün üretimi gerçekleştirilebilir. Oluşan atık CO₂ gazı, MK gibi biyolojik proseslerde atık kategorisinden çıkarılarak hammadde kategorisine dönüştürülebilir.
3. Başta atıklardan enerji üretiminde olmak üzere, pek çok farklı endüstriyel sektörde oluşan CO₂ emisyonunun biyolojik prosesler vasıtasıyla tüketimi/azaltılması mümkündür.
4. Basınçlandırma ile MK’nin karbondioksit tutma verimi artırılabilse de bu artırım sadece abiyotik çökelim için gerçekleşmektedir. Biyotik çökelme açısından ise basınçlandırma olumlu sonuç vermemektedir. Daha iyi proses kontrolü ve sistemin daha detaylı incelemesinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç vardır. Sistemdeki biyotik karbon yakalamanın olumsuz etkilenmesinin ana sebebinin mikroorganizmaların basınlandırmadan etkilenmesi mi yoksa sıvı ortamdaki çözünmüş CO₂ gazına bağlı pH düşüşü m olduğu net olarak tespit edilmelidir. Eğer sorun pH değişimi ise, basınçlandırılmış MK sisteminde pH kontrolünün sistem verimini etkilemeden optimizasyonunun mümkün olup olmadığı daha detaylı bir biçimde araştırılmalıdır. Eğer

mikroorganizmaların basınçtan olumsuz etkilenmesi söz konusu ise bu durumda da genetik modifikasyon ve mutasyon çalışmaları ile basınca daha dayanıklı türlerin geliştirilmesi yoluna gidilebilir. Ayrıca halihazırda basınç şartlarına dayanıma sahip olan yeni türlerin aranması yoluna da gitmek mümkündür. Su seviyesinin her 10m’de 1 Bar basınç artışına neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle su yüzeyinden 20 m aşağıda olması sebebiyle yaklaşık 3 Bar basınç altında olup sarkıt/dikit oluşumu gösteren Hatay’daki “Bilge Taş” isimli su altı mağarasının basınç koşullarına dayanıklı mikrobiyal türler açısından büyük potansiyel taşıdığı düşünülmektedir.

5. Bu çalışma ile ortaya konulan MKÇ’nin atıktan enerji üreten tesislerde uygulanmasının çevresel etki sonuçları, Türkiye’nin iklim anlaşmaları ile belirlenen CO₂ emisyonu azaltma hedeflerine uyum sağlamasına katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Elbette MKÇ’nin sadece atıktan-enerji dönüşüm tesislerinde değil, aynı zamanda yoğun karbon emisyonuna sahip sektörlerde (örn: çimento üretim sektörü) uygulanması da CO₂ emisyonu azaltma hedeflerine uyum açısından fayda sağlayacaktır.

Bu çalışmanın kazanımlarını 3 ana başlık altında özetlemek mümkündür;

Mikrobiyal kalsit çökelimi ile karbon yakalama mekanizmasının anlaşılması:

Karbon yakalama ve faydalı ürün üretimi teknolojileri arasında yer alan MKÇ, mikrobiyal metabolizma kullanan biyokimyasal bir dönüşüm yöntemi olması nedeniyle farklılaşmaktadır. Bu yöntem sayesinde CO₂ yakalamanın yanı sıra faydalı ürün olarak da CaCO₃ üretilmektedir. Bu çalışma ile, MKÇ’nin iklim değişimiyle küresel mücadele çabalarına destek veren bir yöntem olduğu ve aynı zamanda da kaynakların verimli kullanımı açısından da olumlu bir profile sahip olduğu ortaya koyulmaktadır.

Endüstriye olan katkı: Son yıllarda karbon emisyonu yoğun sektörlerin karbon emisyonu azaltma ve karbon yakalamaya olan ilgileri artış göstermektedir. MKÇ’nin bu alanda katkı sağlama potansiyeli ortadadır. Endüstriyel tesisler ile MKÇ’nin entegrasyonu bu tesislerin çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Bu amaçla bu tez çalışmasında enerji sektörü biyokütle-enerji dönüşümü çerçevesinde baz alınarak MKÇ kullanımında ne şekilde çevresel etki oluşturduğu ortaya konulmuştur. Bu ve benzer çalışmaların gerçekleştirilmesi

endüstrilerin gelecekte emisyon azaltımı hedeflerine ulaşması açısından önemlidir.

MKÇ yapabilen yerel mikrobiyal toplulukların keşfedilmesi: Türkiye coğrafi şekiller ve iklimin bölgesel olarak farklı özellikler göstermesi sebebiyle yerel mikrobiyal toplulukların keşfedilmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada da Denizli’de yer alan traverten türü yapıya sahip 3 farklı noktadaki su kaynağının üçünde de üreaz aktivitesinin ve kalsit çökelimi yapma potansiyeli yapan mikroorganizmaların varlığı tespit edilmiştir. Özellikle Denizli çevresinde Traverten yapılarının fazlalığı dolayısıyla bu bölgedeki mikrobiyal kalsit çökelimi yapan mikrobiyal toplulukların keşfedilme potansiyeli araştırmacılar için altın niteliğindedir ve henüz mikrobiyal araştırmalar yapılmamış birçok traverten yapısı ve karstik mağara bulunmaktadır. Mikrobiyal kalsit çökelimi sadece kalsiyum karbonat üretimi için değil aynı zamanda Bölüm 6.3’te bahsedilen alternatif kullanım alanları açısından da büyük önem taşır. Bu çalışma halihazırda zenginleştirilmiş mikrobiyal topluluğun farklı alanlarda kullanımı açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Ayrıca bu çalışmanın sonuçlarının MKÇ yapabilen diğer türlerin yeni su ortamlarında keşfi için araştırmacılara bir teşvik oluşturacağı ümit edilmektedir. Yeni ve daha verimli MKÇ metabolizmasına sahip türlerin keşfedilmesi birçok araştırma alanına önemli katkılar sağlayacaktır.

- [1] M. G. Lawrence ve S. Schäfer, “Promises and perils of the Paris Agreement”, *Science*, c. 364, sy 6443, ss. 829-830, 2019, doi: 10.1126/science.aaw4602.
- [2] European Comission, “The EU: Driving Global Climate Action”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://ec.europa.eu/fpi/sites/fpi/files/climate_action_pi_fact_sheet-final_1_v2.pdf
- [3] European Comission vd., *Research and innovation for climate neutrality by 2050 – Challenges, opportunities and the path forward*. Publications Office of the European Union, 2024. doi: doi/10.2777/459259.
- [4] European Union, “EU Climate Target Plan 2030: Building a modern, sustainable and resilient Europe”, 2020.
- [5] European Parliament and Council, *Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council: Establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism*. 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R0956>
- [6] Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions, “Fit For 55: Delivering The Eu’s 2030 Climate Target On The Way To Climate Neutrality”, 2021. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>
- [7] C. Böhringer, C. Fischer, K. E. Rosendahl, ve T. F. Rutherford, “Potential impacts and challenges of border carbon adjustments”, *Nature Climate Change*, c. 12, sy 1, ss. 22-29, Oca. 2022, doi: 10.1038/s41558-021-01250-z.
- [8] German Environment Agency, “Introduction of a Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) in the EU”, Umwelt Bundesamt, 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/cbam_factsheet_0.pdf
- [9] Clingendael – the Netherlands Institute of International Relations, L. van Schaik, P. Pauw, ve G. Cretti, “The CBAM Effect: how Clingendael Alert the world is responding to the EU’s new climate stick”, 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.clingendael.org/sites/default/files/2022-05/Alert_CBAM_effect.pdf
- [10] Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, “Yanı Başımızdaki Dev Pazar Avrupa Birliği”, Uluslararası İlişkiler: Avrupa Birliği. Erişim: 04 Temmuz 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/avrupa-birligi/yani-basimizdaki-dev-pazar-avrupa-birligi>
- [11] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye Ulusal Enerji Planı”, 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:

https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

- [12] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası”, 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-celik-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>
- [13] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “Türkiye Alüminyum Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası”, 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-aluminyum-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>
- [14] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası”, 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-cimento-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>
- [15] S. Vaz, A. P. R. de Souza, ve B. E. L. Baeta, “Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors”, *Cleaner Engineering and Technology*, c. 8, s. 100456, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>.
- [16] J. T. DeJong, B. M. Mortensen, B. C. Martinez, ve D. C. Nelson, “Bio-mediated soil improvement”, *Ecological Engineering*, c. 36, sy 2, ss. 197-210, Şub. 2010, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.029.
- [17] M. A. Gol'dberg vd., “Hydroxyapatite-calcium carbonate ceramic composite materials”, *Inorg Mater*, c. 46, sy 11, ss. 1269-1273, Kas. 2010, doi: 10.1134/S0020168510110208.
- [18] J. Gong, T. Liu, D. Song, X. Zhang, ve L. Zhang, “One-step fabrication of three-dimensional porous calcium carbonate–chitosan composite film as the immobilization matrix of acetylcholinesterase and its biosensing on pesticide”, *Electrochemistry Communications*, c. 11, sy 10, ss. 1873-1876, Eki. 2009, doi: 10.1016/j.elecom.2009.08.005.
- [19] C. A. Kumins, “Surface-Treated Calcium Carbonates in a High-Solid Paint System”, *Ind. Eng. Chem.*, c. 44, sy 8, ss. 1844-1849, Ağu. 1952, doi: 10.1021/ie50512a037.
- [20] O. Velts, M. Uibu, J. Kallas, ve R. Kuusik, “Waste oil shale ash as a novel source of calcium for precipitated calcium carbonate: Carbonation mechanism, modeling, and product characterization”, *Journal of Hazardous Materials*, c. 195, ss. 139-146, Kas. 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.08.019.
- [21] V. S. Whiffin, L. A. Van Paassen, ve M. P. Harkes, “Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique”, *Geomicrobiology Journal*, c. 24, sy 5, ss. 417-423, Ağu. 2007, doi: 10.1080/01490450701436505.
- [22] Y.-H. Yun, S.-B. Kim, B.-A. Kang, Y.-W. Lee, J.-S. Oh, ve K.-S. Hwang, “ β -wollastonite reinforced glass-ceramics prepared from waste fluorescent glass and calcium carbonate”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 178, sy 1, ss. 61-66, Eyl. 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.11.021.

- [23] A. B. Yur'ev, L. A. Godik, Yu. D. Devyatkin, N. A. Kozyrev, ve A. V. Tokarev, "Reduction of rail steel by calcium carbonate", *Steel Transl.*, c. 38, sy 4, ss. 312-314, Nis. 2008, doi: 10.3103/S0967091208040128.
- [24] S. Maleki Dizaj, M. Barzegar-Jalali, M. Zarrintan, K. Adibkia, ve F. Lotfipour, "Calcium carbonate nanoparticles; Potential in bone and tooth disorders", *Pharmaceutical Sciences*, c. 20, ss. 175-182, Mar. 2015, doi: 10.5681/PS.2015.008.
- [25] Ö. Doğan, "Kalsiyum Karbonat Polimorflarının Oluşumuna Yaşlandırma Süresinin Etkisi", *Iğdır Üniv. Fen Bil Enst. Der.*, c. 8, sy 3, ss. 227-236, Eyl. 2018, doi: 10.21597/jist.458641.
- [26] R. Salomão, L. M. M. Costa, ve G. M. D. Olyveira, "Precipitated Calcium Carbonate Nano-Microparticles: Applications in Drug Delivery", *ATROA*, c. 3, sy 2, Kas. 2017, doi: 10.15406/atroa.2017.03.00059.
- [27] D. B. Trushina, T. V. Bukreeva, M. V. Kovalchuk, ve M. N. Antipina, "CaCO₃ vaterite microparticles for biomedical and personal care applications.", *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, c. 45, ss. 644-658, Ara. 2014, doi: 10.1016/j.msec.2014.04.050.
- [28] S. Castanier, G. Le Métayer-Levrel, ve J.-P. Perthuisot, "Ca-carbonates precipitation and limestone genesis — the microbiogeologist point of view", *Sedimentary Geology*, c. 126, sy 1, ss. 9-23, Tem. 1999, doi: 10.1016/S0037-0738(99)00028-7.
- [29] C. E. Boyd, "Carbon Dioxide, pH, and Alkalinity", içinde *Water Quality: An Introduction*, Cham: Springer International Publishing, 2020, ss. 177-203. doi: 10.1007/978-3-030-23335-8_9.
- [30] A. J. Phillips, R. Gerlach, E. Lauchnor, A. C. Mitchell, A. B. Cunningham, ve L. Spangler, "Engineered applications of ureolytic biomineralization: a review", *Biofouling*, c. 29, sy 6, ss. 715-733, Tem. 2013, doi: 10.1080/08927014.2013.796550.
- [31] A. C. Mitchell, E. J. Espinosa-Ortiz, S. L. Parks, A. J. Phillips, A. B. Cunningham, ve R. Gerlach, "Kinetics of calcite precipitation by ureolytic bacteria under aerobic and anaerobic conditions", *Biogeosciences*, c. 16, sy 10, ss. 2147-2161, May. 2019, doi: 10.5194/bg-16-2147-2019.
- [32] G. D. O. Okwadha ve J. Li, "Optimum conditions for microbial carbonate precipitation", *Chemosphere*, c. 81, sy 9, ss. 1143-1148, Kas. 2010, doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.066.
- [33] S. Douglas ve T. J. Beveridge, "Mineral formation by bacteria in natural microbial communities", *FEMS Microbiology Ecology*, c. 26, sy 2, ss. 79-88, Haz. 1998, doi: 10.1111/j.1574-6941.1998.tb00494.x.
- [34] N. Yıldırım, Y. Gürtuğ, ve C. Sesal, "Mikrobiyal Kalsiyum Karbonat Oluşum Mekanizmaları Ve Uygulama Alanları", *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, c. 28, ss. 70-80, 2016.
- [35] T. Ghosh, S. Bhaduri, C. Montemagno, ve A. Kumar, "Sporosarcina pasteurii can form nanoscale calcium carbonate crystals on cell surface", *PLoS ONE*, c. 14, sy 1, s. e0210339, Oca. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0210339.

- [36] D. Kumari, X.-Y. Qian, X. Pan, V. Achal, Q. Li, ve G. M. Gadd, "Chapter Two - Microbially-induced Carbonate Precipitation for Immobilization of Toxic Metals", içinde *Advances in Applied Microbiology*, c. 94, S. Sariaslani ve G. M. Gadd, Ed., Academic Press, 2016, ss. 79-108. doi: 10.1016/bs.aambs.2015.12.002.
- [37] P. Anbu, C.-H. Kang, Y.-J. Shin, ve J.-S. So, "Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications", *SpringerPlus*, c. 5, sy 1, s. 250, Mar. 2016, doi: 10.1186/s40064-016-1869-2.
- [38] Q. Chunxiang, W. Jianyun, W. Ruixing, ve C. Liang, "Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO₃ by *Bacillus pasteurii*", *Materials Science and Engineering: C*, c. 29, sy 4, ss. 1273-1280, May. 2009, doi: 10.1016/j.msec.2008.10.025.
- [39] H. Canakci, W. Sidik, ve I. H. Kilic, "Bacterail Calcium Carbonate Precipitation in Peat", *Arab J Sci Eng*, c. 40, sy 8, ss. 2251-2260, Ağu. 2015, doi: 10.1007/s13369-015-1760-4.
- [40] S. Stocks-Fischer, J. K. Galinat, ve S. S. Bang, "Microbiological precipitation of CaCO₃", *Soil Biology and Biochemistry*, c. 31, sy 11, ss. 1563-1571, Eki. 1999, doi: 10.1016/S0038-0717(99)00082-6.
- [41] J. Xu, Y. Du, Z. Jiang, ve A. She, "Effects of Calcium Source on Biochemical Properties of Microbial CaCO₃ Precipitation", *Frontiers in Microbiology*, c. 6, 2015, Erişim: 30 Mayıs 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2015.01366>
- [42] M. C. Akdemir, "Microbial calcium mineralization from urease and carbonic anhydrase producing *Lysinibacillus Fusiformis* U1", Pamukkale University, Denizli, Turkey, 2019. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/238961>
- [43] W. Khaliq ve M. B. Ehsan, "Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques", *Construction and Building Materials*, c. 102, ss. 349-357, Oca. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006.
- [44] R. Siddique, K. Singh, Kunal, M. Singh, V. Corinaldesi, ve A. Rajor, "Properties of bacterial rice husk ash concrete", *Construction and Building Materials*, c. 121, ss. 112-119, Eyl. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.146.
- [45] R. Andalib vd., "Optimum concentration of *Bacillus megaterium* for strengthening structural concrete", *Construction and Building Materials*, c. 118, ss. 180-193, Ağu. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.142.
- [46] J. Wang, J. Dewanckele, V. Cnudde, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, ve N. De Belie, "X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete", *Cement and Concrete Composites*, c. 53, ss. 289-304, Eki. 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.014.
- [47] C. J. Gray ve A. S. Engel, "Microbial diversity and impact on carbonate geochemistry across a changing geochemical gradient in a karst aquifer", *ISME J*, c. 7, sy 2, Art. sy 2, Şub. 2013, doi: 10.1038/ismej.2012.105.
- [48] D. Sarda, H. S. Choonia, D. D. Sarode, ve S. S. Lele, "Biocalcification by *Bacillus pasteurii* urease: a novel application", *Journal of Industrial*

- Microbiology and Biotechnology*, c. 36, sy 8, ss. 1111-1115, Ağu. 2009, doi: 10.1007/s10295-009-0581-4.
- [49] V. Achal, A. Mukherjee, P. C. Basu, ve M. S. Reddy, "Strain improvement of *Sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production", *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, c. 36, sy 7, ss. 981-988, Tem. 2009, doi: 10.1007/s10295-009-0578-z.
 - [50] V. Achal, A. Mukherjee, P. C. Basu, ve M. S. Reddy, "Lactose mother liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by *Sporosarcina pasteurii*", *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, c. 36, sy 3, ss. 433-438, Mar. 2009, doi: 10.1007/s10295-008-0514-7.
 - [51] V. Achal, A. Mukherjee, ve M. S. Reddy, "Biocalcification by *Sporosarcina pasteurii* using corn steep liquor as the nutrient source", *Industrial Biotechnology*, c. 6, sy 3, ss. 170-174, Haz. 2010, doi: 10.1089/ind.2010.6.170.
 - [52] V. Achal, X. Pan, ve D. Zhang, "Remediation of copper-contaminated soil by *Kocuria flava* CR1, based on microbially induced calcite precipitation", *Ecological Engineering*, c. 37, sy 10, ss. 1601-1605, Eki. 2011, doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.06.008.
 - [53] V. Achal, X. Pan, Q. Fu, ve D. Zhang, "Biomineralization based remediation of As(III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli*", *Journal of Hazardous Materials*, c. 201-202, ss. 178-184, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.11.067.
 - [54] V. Achal, X. Pan, ve D. Zhang, "Bioremediation of strontium (Sr) contaminated aquifer quartz sand based on carbonate precipitation induced by Sr resistant *Halomonas* sp.", *Chemosphere*, c. 89, sy 6, ss. 764-768, Eki. 2012, doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.06.064.
 - [55] V. Achal, A. Mukerjee, ve M. Sudhakara Reddy, "Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures", *Construction and Building Materials*, c. 48, ss. 1-5, Kas. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061.
 - [56] N. K. Dhami, M. S. Reddy, ve A. Mukherjee, "Biomineralization of Calcium Carbonate Polymorphs by the Bacterial Strains Isolated from Calcareous Sites", *J. Microbiol. Biotechnol.*, c. 23, sy 5, ss. 707-714, May. 2013, doi: 10.4014/jmb.1212.11087.
 - [57] T. Onal Okay ve D. Frigi Rodrigues, "High throughput colorimetric assay for rapid urease activity quantification", *Journal of Microbiological Methods*, c. 95, sy 3, ss. 324-326, Ara. 2013, doi: 10.1016/j.mimet.2013.09.018.
 - [58] V. Achal ve X. Pan, "Influence of Calcium Sources on Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation by *Bacillus* sp. CR2", *Appl Biochem Biotechnol*, c. 173, sy 1, ss. 307-317, May. 2014, doi: 10.1007/s12010-014-0842-1.
 - [59] C.-H. Kang, S.-H. Han, Y. Shin, S. J. Oh, ve J.-S. So, "Bioremediation of Cd by Microbially Induced Calcite Precipitation", *Appl Biochem*

- Biotechnol*, c. 172, sy 4, ss. 1929-1937, Şub. 2014, doi: 10.1007/s12010-013-0626-z.
- [60] N. K. Dhimi, M. S. Reddy, ve A. Mukherjee, “Synergistic Role of Bacterial Urease and Carbonic Anhydrase in Carbonate Mineralization”, *Appl Biochem Biotechnol*, c. 172, sy 5, ss. 2552-2561, Mar. 2014, doi: 10.1007/s12010-013-0694-0.
 - [61] A. Kumar ve S. R. Samadder, “A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste”, *Waste Management*, c. 69, ss. 407-422, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>.
 - [62] W. W. S. Charters, “Developing markets for renewable energy technologies”, *Renewable Energy*, c. 22, sy 1, ss. 217-222, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00018-5).
 - [63] R. Kothari, V. V. Tyagi, ve A. Pathak, “Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 14, sy 9, ss. 3164-3170, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.05.005>.
 - [64] O. K. M. Ouda, S. A. Raza, A. S. Nizami, M. Rehan, R. Al-Waked, ve N. E. Korres, “Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 61, ss. 328-340, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>.
 - [65] S. Shafiee ve E. Topal, “When will fossil fuel reserves be diminished?”, *Energy Policy*, c. 37, sy 1, ss. 181-189, Oca. 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2008.08.016.
 - [66] T. Fruergaard ve T. Astrup, “Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective”, *Waste Management*, c. 31, sy 3, ss. 572-582, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.009>.
 - [67] M. Khalil, M. A. Berawi, R. Heryanto, ve A. Rizalie, “Waste to energy technology: The potential of sustainable biogas production from animal waste in Indonesia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 105, ss. 323-331, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.011>.
 - [68] P. Abdesahia, M. G. Dashti, M. S. Kalil, ve W. M. W. Yusoff, “Production of Biofuel using Biomass as a Sustainable Biological Resource”, *Biotechnology*, c. 9, sy 3, ss. 274-282, Haz. 2010, doi: 10.3923/biotech.2010.274.282.
 - [69] S. E. Hosseini, M. A. Wahid, ve N. Aghili, “The scenario of greenhouse gases reduction in Malaysia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 28, sy C, ss. 400-409, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.04.
 - [70] J. Gug, D. Cacciola, ve M. J. Sobkowicz, “Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics”, *Waste Management*, c. 35, ss. 283-292, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.031>.
 - [71] A. Tozlu, E. Özahi, ve A. Abuşoğlu, “Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep”, *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, c. 54, ss. 809-815, Şub. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.097.
- [72] C. Achillas, C. Vlachokostas, N. Moussiopoulos, G. Banias, G. Kafetzopoulos, ve A. Karagiannidis, “Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area”, *Resources, Conservation and Recycling*, c. 55, sy 9, ss. 857-863, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.012>.
- [73] D. Hoornweg ve P. Bhada-Tata, “What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management”, World Bank, Washington DC, 2012.
- [74] Waste Atlas, “D-Waste”. Erişim: 16 Mayıs 2021. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.atlas.d-waste.com/>
- [75] T.C. Resmi Gazete, *T.C. Resmi Gazete* 22533. 2010.
- [76] TÜİK-Türkiye İstatistik Kurumu, “Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ve payları”. 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/DownloadIstatistikselTablo?p=hv0qgcMqjdHsNDo490Huzl9whNeIsAz586zJQqDuX4s2V9RWGYM3bwvfiPBXeuyp>
- [77] TEİAŞ-Türkiye Elektrik İletim A.Ş., “38-Grafik III.I - 2020 Yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı”. 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- [78] T. P. T. Pham, R. Kaushik, G. K. Parshetti, R. Mahmood, ve R. Balasubramanian, “Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions.”, *Waste Manag*, c. 38, ss. 399-408, Nis. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.12.004.
- [79] F. and A. O. FAO, “How to Feed the World in 2050”, Food and Agriculture Organization, 2009.
- [80] IPCC, “Chapter 2”, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [81] F. and A. O. FAO, “Global Food Losses and Food Waste– Extent, Causes and Prevention”, Rome, 2011.
- [82] L. A. Pfaltzgraff, M. De bruyn, E. C. Cooper, V. Budarin, ve J. H. Clark, “Food waste biomass: a resource for high-value chemicals”, *Green Chem.*, c. 15, sy 2, ss. 307-314, 2013, doi: 10.1039/C2GC36978H.
- [83] E. Uçkun Kiran, A. P. Trzcinski, W. J. Ng, ve Y. Liu, “Bioconversion of food waste to energy: A review”, *Fuel*, c. 134, ss. 389-399, Eki. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.05.074.
- [84] C. S. K. Lin vd., “Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective”, *Energy Environ. Sci.*, c. 6, sy 2, ss. 426-464, 2013, doi: 10.1039/C2EE23440H.
- [85] A. Tabasová, J. Kropáč, V. Kermes, A. Nemet, ve P. Stehlík, “Waste-to-energy technologies: Impact on environment”, *Energy*, c. 44, sy 1, ss. 146-155, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.

- [86] J.-L. Fan, M. Xu, S. Wei, S. Shen, Y. Diao, ve X. Zhang, “Carbon reduction potential of China’s coal-fired power plants based on a CCUS source-sink matching model”, *Resources, Conservation and Recycling*, c. 168, s. 105320, May. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105320.
- [87] A. I. Osman, A. Abdelkader, C. R. Johnston, K. Morgan, ve D. W. Rooney, “Thermal Investigation and Kinetic Modeling of Lignocellulosic Biomass Combustion for Energy Production and Other Applications”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, c. 56, sy 42, ss. 12119-12130, Eki. 2017, doi: 10.1021/acs.iecr.7b03478.
- [88] M. Shahbaz vd., “A state of the art review on biomass processing and conversion technologies to produce hydrogen and its recovery via membrane separation”, *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 45, sy 30, ss. 15166-15195, May. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.009.
- [89] M. Shahbaz vd., “A comprehensive review of biomass based thermochemical conversion technologies integrated with CO2 capture and utilisation within BECCS networks”, *Resources, Conservation and Recycling*, c. 173, s. 105734, Eki. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105734.
- [90] T. Bhaskar, B. Bhavya, R. Singh, D. V. Naik, A. Kumar, ve H. B. Goyal, “Chapter 3 - Thermochemical Conversion of Biomass to Biofuels”, içinde *Biofuels*, A. Pandey, C. Larroche, S. C. Ricke, C.-G. Dussap, ve E. Gnansounou, Ed., Amsterdam: Academic Press, 2011, ss. 51-77. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00003-6>.
- [91] A. Demirbas, “Combustion characteristics of different biomass fuels”, *Progress in Energy and Combustion Science*, c. 30, sy 2, ss. 219-230, Oca. 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2003.10.004.
- [92] A. Demirbas, “Combustion of Biomass”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, c. 29, sy 6, ss. 549-561, 2007, doi: 10.1080/009083190957694.
- [93] J. Ahrenfeldt, H. Knoef, ve GasNet, *Handbook biomass gasification*. Enschede, Netherlands: BTG Biomass Technology Group, 2005.
- [94] A. V. Bridgwater ve G. Grassi, *Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation*. England: Elsevier Applied Science, 1991.
- [95] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis, Practical Design and Theory*. USA: Elsevier Publication, 2010.
- [96] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 2): conversion technologies”, *Bioresource Technology*, c. 83, sy 1, ss. 47-54, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5).
- [97] L. Garcia, M. L. Salvador, R. Bilbao, ve J. Arauzo, “Influence of Calcination and Reduction Conditions on the Catalyst Performance in the Pyrolysis Process of Biomass”, *Energy & Fuels*, c. 12, sy 1, ss. 139-143, 1998, doi: 10.1021/ef970097j.
- [98] S.-W. Lee, S.-B. Kim, K.-W. Lee, ve C.-S. Choi, “CATALYTIC GASIFICATION OF RICE STRAW AT LOW TEMPERATURE”, *Environmental Engineering Research*, c. 4, sy 4, ss. 293-300, Ara. 1999.

- [99] G. C. Young, "MSW Processes to Energy with High-Value Products and Specialty by-Products", içinde *Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, ss. 155-207. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470608616.ch10>.
- [100] R. F. Susanti, J. Kim, ve K. Yoo, "Chapter 6 - Supercritical Water Gasification for Hydrogen Production: Current Status and Prospective of High-Temperature Operation", içinde *Supercritical Fluid Technology for Energy and Environmental Applications*, V. Anikeev ve M. Fan, Ed., Boston: Elsevier, 2014, ss. 111-137. doi: 10.1016/B978-0-444-62696-7.00006-X.
- [101] M. Kosseva, "Management and Processing of Food Wastes", içinde *Comprehensive Biotechnology*, c. 6, 2011, ss. 557-593. doi: 10.1016/B978-0-08-088504-9.00393-7.
- [102] K. C. Surendra, D. Takara, A. G. Hashimoto, ve S. K. Khanal, "Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 31, ss. 846-859, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.015.
- [103] J. D. Murphy, E. McKeogh, ve G. Kiely, "Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation", *Applied Energy*, c. 77, sy 4, ss. 407-427, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.07.005>.
- [104] N. Scarlat, V. Motola, J. F. Dallemand, F. Monforti-Ferrario, ve L. Mofor, "Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 50, ss. 1269-1286, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>.
- [105] J. Sánchez, M. D. Curt, N. Robert, ve J. Fernández, "Chapter Two - Biomass Resources", içinde *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*, C. Lago, N. Caldés, ve Y. Lechón, Ed., Academic Press, 2019, ss. 25-111. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00002-9>.
- [106] M. Niaounakis ve C. P. Halvadakis, "Olive Processing Waste Management: Literature Review and Patent Survey", 2006. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106764607>
- [107] Dr. A.-S. Nizami, M. Rehan, I. Ismail, T. Almeelbi, ve O. Ouda, "Waste Biorefinery in Makkah: A Solution to Convert Waste produced during Hajj and Umrah Seasons into Wealth", May. 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.4303.6560.
- [108] ISO 14040, "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework Management". 2006.
- [109] TS EN ISO14040, "Çevre yönetimi - Hayat boyu değerlendirme - İlkeler ve çerçeve". 2007.
- [110] ISO 14044, "Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines Management". International Organization for Standardization, 2006.

- [111] H. Gervasio ve S. Dimova, “Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings”, Publications Office of the European Union, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: doi:10.2760/10016
- [112] T. Onal Okyay, H. N. Nguyen, S. L. Castro, ve D. F. Rodrigues, “CO₂ sequestration by ureolytic microbial consortia through microbially-induced calcite precipitation”, *Science of The Total Environment*, c. 572, ss. 671-680, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.199.
- [113] K. R. Natarajan, “Kinetic Study of the Enzyme Urease from *Dolichos biflorus*”, *J. Chem. Educ.*, c. 72, sy 6, s. 556, Haz. 1995, doi: 10.1021/ed072p556.
- [114] M. Martin, “Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads”, *EMBnet.journal*, c. 17, sy 1, Art. sy 1, May. 2011, doi: 10.14806/ej.17.1.200.
- [115] A. Amir vd., “Deblur Rapidly Resolves Single-Nucleotide Community Sequence Patterns”, *mSystems*, c. 2, sy 2, ss. e00191-16, 2017, doi: 10.1128/mSystems.00191-16.
- [116] S.-G. Choi, S.-S. Park, S. Wu, ve J. Chu, “Methods for Calcium Carbonate Content Measurement of Biocemented Soils”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, c. 29, sy 11, s. 06017015, Kas. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002064.
- [117] V. N. Gunaseelan, “Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review.”, *Biomass and Bioengineering*, c. 13, sy 1/2, ss. 83-114, 1997.
- [118] İ. Sel, M. Cakmakçı, B. Ozkaya, ve F. Güreli, “BMP estimation of landfilled municipal solid waste by multivariate statistical methods using specific waste parameters: case study of a sanitary landfill in Turkey”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Eyl. 2016, doi: 10.1007/s10163-016-0543-7.
- [119] D. Tonini, P. F. Albizzati, ve T. F. Astrup, “Environmental impacts of food waste: Learnings and challenges from a case study on UK.”, *Waste Manag*, c. 76, ss. 744-766, Haz. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.03.032.
- [120] F. Piccinno, R. Hischer, S. Seeger, ve C. Som, “From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies”, *Journal of Cleaner Production*, c. 135, ss. 1085-1097, Kas. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.164.
- [121] E. B. Kosma, N. Manav-Demir, H. Civelek-Yoruklu, ve B. Ozkaya, “Enrichment, characterization, and sand consolidation application of urease active calcite-producing bacteria.”, *Environ Sci Pollut Res Int*, c. 31, sy 2, ss. 2466-2480, Oca. 2024, doi: 10.1007/s11356-023-31332-8.
- [122] K. Yuan, S. S. Lee, V. De Andrade, N. C. Sturchio, ve P. Fenter, “Replacement of Calcite (CaCO₃) by Cerussite (PbCO₃)”, *Environ. Sci. Technol.*, c. 50, sy 23, ss. 12984-12991, Ara. 2016, doi: 10.1021/acs.est.6b03911.
- [123] Y. Kim, S. Kwon, ve Y. Roh, “Effect of Divalent Cations (Cu, Zn, Pb, Cd, and Sr) on Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation and

- Mineralogical Properties”, *Frontiers in Microbiology*, c. 12, 2021, Erişim: 30 Mayıs 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.646748>
- [124] P. A. M. Lesley A. Warren Nagina Parmar, F. Grant Ferris, “Microbially Mediated Calcium Carbonate Precipitation: Implications for Interpreting Calcite Precipitation and for Solid-Phase Capture of Inorganic Contaminants”, *Geomicrobiology Journal*, c. 18, sy 1, ss. 93-115, Oca. 2001, doi: 10.1080/01490450151079833.
- [125] M. P. Harkes, L. A. van Paassen, J. L. Booster, V. S. Whiffin, ve M. C. M. van Loosdrecht, “Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement”, *Ecological Engineering*, c. 36, sy 2, ss. 112-117, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.01.004>.
- [126] Martinez B. C. vd., “Experimental Optimization of Microbial-Induced Carbonate Precipitation for Soil Improvement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, c. 139, sy 4, ss. 587-598, Nis. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000787.
- [127] N. Hataf ve A. Baharifard, “Reducing Soil Permeability Using Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) Method: A Case Study of Shiraz Landfill Soil”, *Geomicrobiology Journal*, c. 37, sy 2, ss. 147-158, Şub. 2020, doi: 10.1080/01490451.2019.1678703.
- [128] Y. Tian, Z. Li, S. Wang, Y. Zhou, D. Li, ve L. Fu, “Application of MICP in Water Stability and Hydraulic Erosion Control of Phosphogypsum Material in Slope”, *Applied Sciences*, c. 12, sy 4, s. 1783, Şub. 2022, doi: 10.3390/app12041783.
- [129] L. Cheng ve R. Cord-Ruwisch, “Upscaling Effects of Soil Improvement by Microbially Induced Calcite Precipitation by Surface Percolation”, *Geomicrobiology Journal*, c. 31, sy 5, ss. 396-406, May. 2014, doi: 10.1080/01490451.2013.836579.
- [130] N.-J. Jiang ve K. Soga, “Erosional behavior of gravel-sand mixtures stabilized by microbially induced calcite precipitation (MICP)”, *Soils and Foundations*, c. 59, sy 3, ss. 699-709, Haz. 2019, doi: 10.1016/j.sandf.2019.02.003.
- [131] S. Rodin, P. Champagne, ve V. Mann, “Pilot-scale feasibility study for the stabilization of coal tailings via microbially induced calcite precipitation”, *Environ Sci Pollut Res*, c. 30, sy 4, ss. 8868-8882, Eyl. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-22316-1.
- [132] D. de Oliveira, E. J. Horn, ve D. G. Randall, “Copper mine tailings valorization using microbial induced calcium carbonate precipitation”, *Journal of Environmental Management*, c. 298, s. 113440, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113440>.
- [133] Y. Lai, J. Yu, S. Liu, J. Liu, R. Wang, ve B. Dong, “Experimental study to improve the mechanical properties of iron tailings sand by using MICP at low pH”, *Construction and Building Materials*, c. 273, s. 121729, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121729>.

- [134] X. Ou, Y. Peng, K. Hou, J. Su, ve J. Jiang, “Experimental research on biochemical consolidation of bauxite tailings clay”, *Arab J Geosci*, c. 12, sy 24, s. 772, Ara. 2019, doi: 10.1007/s12517-019-4958-z.
- [135] L. Hu vd., “Experimental Study on the Solidification of Uranium Tailings and Uranium Removal Based on MICP”, *Sustainability*, c. 15, sy 16, s. 12387, Ağu. 2023, doi: 10.3390/su151612387.
- [136] G. L. Métayer-Levrel, S. Castanier, G. Orial, J.-F. Loubière, ve J.-P. Perthuisot, “Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony”, *Sedimentary Geology*, c. 126, sy 1, ss. 25-34, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00029-9).
- [137] S. Marín-Ortega, M. Àngels Calvo I Torras, ve M. Á. Iglesias-Campos, “Microbially induced calcium carbonate precipitation in fossil consolidation treatments: Preliminary results inducing exogenous *Myxococcus xanthus* bacteria in a miocene *Cheirogaster richardi* specimen”, *Heliyon*, c. 9, sy 7, s. e17597, Tem. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17597.
- [138] P. Tiano, L. Biagiotti, ve G. Mastromei, “Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation”, *Journal of Microbiological Methods*, c. 36, sy 1, ss. 139-145, May. 1999, doi: 10.1016/S0167-7012(99)00019-6.
- [139] E. May, “Novel approaches to conserve our European heritage: bioremediation for building restoration of the urban stone heritage in European states”, s. 2001-00055, 2001.
- [140] J. Dick vd., “Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species.”, *Biodegradation*, c. 17, sy 4, ss. 357-367, Ağu. 2006, doi: 10.1007/s10532-005-9006-x.
- [141] S. O. Ahmed, A. A. Nasser, R. N. Abbas, M. M. Kamal, M. A. Zahran, ve N. M. Sorour, “Production of bioconcrete with improved durability properties using Alkaliphilic Egyptian bacteria”, *3 Biotech*, c. 11, sy 5, s. 231, May. 2021, doi: 10.1007/s13205-021-02781-0.
- [142] M. Nodehi, T. Ozbakkaloglu, ve A. Gholampour, “A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties”, *Journal of Building Engineering*, c. 49, s. 104038, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104038>.
- [143] H. M. Jonkers, “Self Healing Concrete: A Biological Approach”, içinde *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, S. van der Zwaag, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 2007, ss. 195-204. doi: 10.1007/978-1-4020-6250-6_9.
- [144] W. Pungrasmi, J. Intarasoontron, P. Jongvivatsakul, ve S. Likitlersuang, “Evaluation of Microencapsulation Techniques for MICP Bacterial Spores Applied in Self-Healing Concrete”, *Sci Rep*, c. 9, sy 1, s. 12484, Ağu. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-49002-6.

- [145] S. K. Ramachandran, V. Ramakrishnan, ve S. S. Bang, "Remediation of Concrete Using Microorganisms", *ACI Materials Journal*, c. 98, ss. 3-9, Oca. 2001, doi: 10.14359/10154.
- [146] N. De Belie ve W. Muynck, "Crack repair in concrete using biodeposition", ss. 777-781, Eki. 2008, doi: 10.1201/9781439828403.ch107.
- [147] S. S. Bang, J. J. Lippert, U. Yerra, S. Mulukutla, ve V. Ramakrishnan, "Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation", *International Journal of Smart and Nano Materials*, c. 1, sy 1, ss. 28-39, Şub. 2010, doi: 10.1080/19475411003593451.
- [148] P. Ghosh, S. Mandal, B. D. Chattopadhyay, ve S. Pal, "Use of microorganism to improve the strength of cement mortar", *Cement and Concrete Research*, c. 35, sy 10, ss. 1980-1983, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.005>.
- [149] A. Mukherjee, V. Achal, ve M. Reddy, "In search of a sustainable binder in building materials", *Ann. Ind. Acad. Eng.*, c. 7, ss. 41-51, Oca. 2010.
- [150] H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, ve E. Schlangen, "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete", *Ecological Engineering*, c. 36, sy 2, ss. 230-235, Şub. 2010, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036.
- [151] V. S. Whiffin, "Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement", 2004.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. E. B. Koşma , H. Civelek-Yörüklü, N. Manav-Demir , B. Özkaya Yiyecek Atıklarının Biyokimyasal Metan Potansiyelinin Kinetik Modeller Kullanılarak İncelenmesi, TURKAY 2022 Türkiye’de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, 24 -26 Ekim 2022, ss. 133-134, İstanbul, Türkiye

Makaleler

1. E. B. Kosma, N. Manav-Demir, H. Civelek-Yoruklu, ve B. Ozkaya, “Enrichment, characterization, and sand consolidation application of urease active calcite-producing bacteria.”, Environ Sci Pollut Res Int, c. 31, sy 2, ss. 2466-2480, Oca. 2024, doi: 10.1007/s11356-023-31332-8.