T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ARITMA ÇAMURU KURUTMA YÖNTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ERKAYA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2024

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ARITMA ÇAMURU KURUTMA YÖNTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ERKAYA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARITMA ÇAMURU KURUTMA YÖNTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ERKAYA

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2024

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARITMA ÇAMURU KURUTMA YÖNTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ERKAYA

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 04/07/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN (Danışman)

Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜ YİĞİT

Doç. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

ÖZET

ARITMA ÇAMURU KURUTMA YÖNTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ERKAYA

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

Haziran 2024; 64 sayfa

Arıtma çamurları, atıksuların arıtılması sırasında açığa çıkan kaçınılmaz bir yan üründür. Arıtma çamurlarının nihai bertaraf yöntemleri ile uzaklaştırılması için su içeriğinin azaltılması gerekmektedir. Çamurun su içeriğinin azaltılması amacıyla, ardışık yoğunlaştırma, susuzlaştırma ve kurutma işlemleri uygulanmaktadır. Ürün ve süreçlerin çevresel etkilerini belirlemek ve azaltmak için yaşam döngüsü analizleri (YDA) uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Arıtma çamurlarının yönetimine yönelik YDA çalışmalarında çamur kurutma en yüksek çevresel etkiye sahip çamur yönetim aşaması olarak belirlenmiştir. Ancak, literatürde farklı çamur kurutma yöntemlerinin çevresel etkilerinin karşılaştırıldığı ve çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirildiği çalışmalar kısıtlıdır.

Bu tezin amacı; termal (bantlı kurutucu, akışkan yataklı kurutucu, döner kurutucu) ve solar çamur kurutma yöntemlerinin çevresel etkilerinin YDA ile belirlenmesi ve belirlenen çevresel etkilerin azaltılması için uygulanabilecek stratejilerin araştırılmasıdır. Bu kapsamda, sadece çamur kurutma aşamasına odaklanılarak kapıdan kapıya yaklaşımıyla kurutma yöntemlerinin çevresel etkileri ve sebep oldukları küresel ısınma potansiyelleri ReCiPe 2016 metodolojisi kullanılarak OpenLCA 1.10 yazılımı ile belirlenmiştir. YDA çalışmaları sonucunda, akışkan yataklı kurutucunun en yüksek çevresel etkiye sahip çamur kurutma teknolojisi olduğu belirlenmiştir. Solar kurutma insan sağlığı ve kaynak tüketimi hasar kategorilerinde en az çevresel etkiye neden olurken, bantlı kurutma ekosistem kalitesi hasar kategorisinde en az çevresel etkiye sebep olmuştur. Çamur kurutmadan kaynaklanan çevresel etkilerin azaltılması için elektrik enerjisi ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından, ısı enerjisi ihtiyacının ise atıkların yakılmasından karşılanması en etkili stratejiler olarak belirlenmiştir. Çamur kurutmadan kaynaklanan gazların kontrolü ve çamurun kurutma ile ulaşılacak nihai katı madde içeriğinin azaltılması stratejileri ise çevresel etkiler azaltmada yetersiz kalan stratejiler olmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Arıtma çamuru, Küresel ısınma potansiyeli, Solar kurutma, Termal kurutma, Yaşam döngüsü analizi

JÜRİ: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜ YİĞİT

Doç. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

ABSTRACT

COMPARISON OF SEWAGE SLUDGE DRYING METHODS BY LIFE CYCLE ASSESSMENT

Onur ERKAYA

MSc Thesis in Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

June 2024; 64 pages

Sewage sludge is an inevitable by-product released during the wastewater treatment. In order to remove sewage sludge by final disposal methods, its water content must be reduced. To reduce the water content of the sludge, sequential thickening, dewatering and drying processes are applied. Life cycle analysis (LCA) applications are becoming widespread to determine and reduce the environmental impacts of products and processes. In YDA studies on the management of sewage sludge, sludge drying has been determined as the sludge management stage with the highest environmental impact. However, there are limited studies in the literature comparing the environmental impacts of different sludge drying methods and developing strategies to reduce environmental impacts.

The aim of this thesis is to determine the environmental effects of thermal (belt dryer, fluidized bed dryer, rotary dryer) and solar sludge drying methods using LCA and to investigate the strategies that can be applied to reduce the determined environmental effects. In this context, the environmental effects of drying methods and the global warming potentials they cause were determined with OpenLCA 1.10 software using the ReCiPe 2016 methodology, with a gate-to-gate approach, focusing only on the sludge drying stage. As a result of YDA studies, it was determined that the fluidized bed dryer is the sludge drying technology with the highest environmental impact. While solar drying caused the least environmental impact in the human health and resource consumption damage categories, belt drying caused the least environmental impact in the ecosystem quality damage category. In order to reduce the environmental impacts resulting from sludge drying, supplementation of the electrical energy need from renewable energy sources and the heat energy need from burning waste have been determined as the most effective strategies. Strategies to control gases resulting from sludge drying and to reduce the final solids content of sludge by drying have been insufficient in reducing environmental impacts.

KEYWORDS: Global warming potential, Life cycle assessment, Sewage sludge, Solar drying, Thermal drying

COMMITTEE: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜ YİĞİT

Assoc. Prof. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

ÖNSÖZ

Her şeyden önce, inişli ve çıkışlı olan bu engebeli yolda benimle birlikte yürüyen ve desteğini hiçbir şekilde eksik etmeyen Canım Ailem; Ziya ERKAYA, Nilgün ERKAYA ve Buket ERKAYA'ya teşekkür ediyorum.

Akademik olarak bu yolda yürümemi sağlayan ve süreci sonuna kadar götürmemde büyük katkısı olan, bilgi ve birikimleri ile sağladığı her türlü desteği ile hedefe ulaşmamdaki en büyük paya sahip, değerli hocam Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN'a teşekkür ediyorum.

Çalışmanın temelini oluşturan Yaşam Döngüsü Analizi'ni öğrenmek adına sağladıkları destekleri için Doç. Dr. Ethem KARADİREK'e teşekkür ediyorum.

Bu çalışmasının gerçekleştirilmesi sürecinde verilerin temini konusunda her türlü sorumuza sağladıkları geri dönüşleri için REDCO firmasına teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ iii
İÇİNDEKİLER iv
AKADEMİK BEYAN vi
SİMGELER VE KISALTMALAR vii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMASI 3
2.1. Arıtma Çamuru 3
2.1.1. Arıtma çamur kaynakları ve özellikleri 3
2.1.2. Çamur stabilizasyon ve bertaraf yöntemleri 3
2.1.3. Türkiye'de arıtma çamurlarına ilişkin yasal durum 4
2.2. Arıtma Çamuru Kurutma Yöntemleri 7
2.2.1. Termal kurutma 7
2.2.2. Solar kurutma 11
2.2.3. Çamur kurutma yöntemlerinin karşılaştırılması 12
2.3. Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) Metodolojisi 14
2.3.1. Amaç ve kapsam belirleme 15
2.3.2. Envanter analizi 15
2.3.3. Etki analizi 15
2.3.4. YDA yorumlama 16
2.3.5. YDA kapsamında kullanılan yazılımlar 18
2.4. Arıtma Çamurları Yönetiminin YDA Kapsamında Değerlendirilmesine Yönelik Çalışmalar 18
3. MATERYAL VE METOT 28
3.1. Amaç ve Kapsam 28
3.2. Fonksiyonel Birim 29
3.3. Envanter Analizi 29
3.4. Yaşam Döngüsü Etki Analizi 32

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 34
4.1. Çamur Kurutma ve Enerji Tüketim Miktarı Hesaplamaları 34
4.1.1. Solar kurutma enerji tüketim miktarı 34
4.1.2. Bantlı kurutma enerji tüketim miktarı 35
4.1.3. Akışkan yataklı kurutma enerji tüketim miktarlarının belirlenmesi 36
4.1.4. Döner kurutma enerji tüketim miktarlarının belirlenmesi 36
4.2. Ana senaryo için yaşam döngüsü etki analizi 37
4.2.1. Çamur kurutmadan kaynaklanan küresel ısınma potansiyelleri 37
4.2.2. Çamur kurutmadan kaynaklanan çevresel etkiler 38
4.3. Çamur Kurutma Senaryolarının Yaşam Döngüsü Etkileri 41
4.3.1. Çamur kurutma senaryolarının insan sağlığı hasar kategorisine etkileri 43
4.3.2. Çamur kurutma senaryolarının ekosistem kalitesi hasar kategorisine etkileri 44
4.3.3. Çamur kurutma senaryolarının kaynak tüketimi hasar kategorisine etkileri 45
4.4. Senaryoların Etki Kategorileri Açısından Değerlendirmesi 46
4.4.1. Bantlı Kurutucu senaryolarının etki kategorileri değerlendirmesi 46
4.4.2. Döner Kurutucu senaryolarının etki kategorileri değerlendirmesi 49
4.4.3. Solar Kurutucu senaryolarının etki kategorileri değerlendirmesi 52
4.5. Çamur Kurutma Senaryolarının Küresel Isınma Potansiyeline Etkileri 55
5. SONUÇLAR 57
6. KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Arıtma Çamuru Kurutma Yöntemlerinin Yaşam Döngüsü Analizi ile Karşılaştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

14/06/2024

Onur ERKAYA

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C	: Santigrat Derece
C	: Karbon
CO_2	: Karbondioksit
CO_2e	:Karbondioksit Eşdeğeri
CH_4	: Metan
$C_6H_4Cl_2$	: Diklorobenzen
C/N	: Karbon/Azot
$FeCl_3$	: Demir Klorür
g	: Gram
kg	: Kilogram
m	: Metre
m^3	: metreküp
mm	: Milimetre
m/s	: Metre/Saniye
N	: Azot
NH_3	: Amonyak
NO_2	: Azot Dioksit
O_2	: Oksijen
P	: Fosfor
PO_4^{-3}	: Fosfat
SO_2^-	: Kükürtdioksit
SO_X	: Kükürt oksit
t	: Ton

Kısaltmalar

AAT : Atıksu Arıtma Tesisi

A^2O : Anaerobik-Anoksik-Aerobik

AB : Avrupa Birliği

AÜ : Akdeniz Üniversitesi

CFCs : Kloroflorakarbonlar

EN : Eşdeğer Nüfus

EVA : Ekonomik Verimlilik Analizi

IPCC : Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli

KM : Katı Madde

KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı

LC_{50} : Ortalama Öldürücü Doz

PE : Kişi Eşdeğeri

SKM : Sabit Katı Madde

TKM : Toplam Katı Madde

UKM : Uçucu Katı Madde

VOC : Uçucu Organik Bileşikler

YDA : Yaşam Döngüsü Analizi

Bu tezde ondalık ayıracı olarak nokta (.) kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Akışkan yataklı kurutucu sistemine ait akış diyagramı (Anonim 2) 8
Şekil 2.2. Bantlı kurutucu sistemine ait akış diyagramı (Anonim 2) 9
Şekil 2.3. Konvansiyonel tip döner kurutucu sisteme ait akış diyagramı (Anonim 2) ... 10
Şekil 2.4. Solar kurutmaya ait akış diyagramı (Anonim 1) 12
Şekil 2.5. YDA Metodolojisi aşamaları 14
Şekil 3.1. ReCiPe 2016 metodolojisi hasar ve etki kategorileri 32
Şekil 4.1. ReCiPe son nokta (H) metodolojisine göre kurutma yöntemlerinin insan sağlığı hasar kategorisindeki yaşam döngüsü etkileri 39
Şekil 4.2. ReCiPe son nokta (H) metodolojisine göre kurutma yöntemlerinin ekosistem kalitesi hasar kategorisindeki yaşam döngüsü etkileri 40
Şekil 4.3. ReCiPe son nokta (H) metodolojisine göre kurutma yöntemlerinin kaynak tüketimi hasar kategorisindeki yaşam döngüsü etkileri 40
Şekil 4.4. Çamur kurutma senaryolarının insan sağlığı hasar kategorisine etkileri 43
Şekil 4.5. Çamur kurutma senaryolarının ekosistem kalitesi hasar kategorisine etkileri 44
Şekil 4.6. Çamur kurutma senaryolarının kaynak tüketimi hasar kategorisine etkileri .. 45
Şekil 4.7. Bantlı kurutucu insan sağlığı hasar kategorisi değerlendirmesi 46
Şekil 4.8. Bantlı kurutucu ekosistem kalitesi hasar kategorisi değerlendirmesi 48
Şekil 4.9. Bantlı kurutucu kaynak tüketimi hasar kategorisi değerlendirmesi 48
Şekil 4.10. Döner kurutucu insan sağlığı hasar kategorisi değerlendirmesi 49
Şekil 4.11. Döner kurutucu ekosistem kalitesi hasar kategorisi değerlendirmesi 51
Şekil 4.12. Döner kurutucu kaynak tüketimi hasar kategorisi değerlendirmesi 52
Şekil 4.13. Solar kurutucu insan sağlığı hasar kategorisi değerlendirmesi 54
Şekil 4.14. Solar kurutucu ekosistem kalitesi hasar kategorisi değerlendirmesi 54
Şekil 4.15. Solar kurutucu kaynak tüketimi hasar kategorisi değerlendirmesi 55
Şekil 4.16. Çamur kurutma senaryoları ile küresel ısınma potansiyelinde elde edilen azalma oranları 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Çamur Kurutma Yöntemlerinin Karşılaştırılması 13
Çizelge 2.2. Yaygın olarak kullanılan yaşam döngüsü etki analizi kategorileri (USEPA, 2006) 17
Çizelge 2.3. Arıtma çamurları yönetimi kapsamında gerçekleştirilen YDA çalışmaları sonuçları 26
Çizelge 3.1. ELCD ve diğer veri tabanlarından kullanılan veri setlerinin ayrıntıları 31
Çizelge 4.1. Solar Kurutma için kullanılan ekipmanların teknik özellikleri ve tüketilen enerji hesabı 35
Çizelge 4.2. Bantlı kurutma sırasında enerji tüketimleri ve tüketilen enerji hesabı 36
Çizelge 4.3. Akışkan yataklı kurutma sırasında enerji tüketimleri ve tüketilen enerji hesabı 36
Çizelge 4.4. Döner kurutucu enerji tüketim verileri 37
Çizelge 4.5. Ana senaryolar için yaşam döngüsü envanteri 37
Çizelge 4.6. 1 ton çamurun %20'den %90'a kadar kurutulmasıyla Küresel Isınma Potansiyeli KM (kg CO_2e/ton KM) 38
Çizelge 4.7. Ana senaryo için YDA sonuçları 39
Çizelge 4.8. Bantlı kurutucu senaryoları için yaşam döngüsü etki analizi sonuçları 47
Çizelge 4.9. Döner kurutucu senaryoları için yaşam döngüsü etki analizi sonuçları 50
Çizelge 4.10. Solar kurutucu senaryoları için yaşam döngüsü etki analizi sonuçları 53
Çizelge 4.11. Farklı senaryolarla elde edilen küresel ısınma potansiyelleri 55

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ve sanayileşme ile kaynak tüketiminde ve atık oluşumunda ciddi ölçüde artış meydana gelmektedir (Hong vd. 2009). Kaynak tüketimi; çeşitli değerli madenlerin ve fosil yakıtların kullanımı başta olmak üzere; su ve enerji tüketimini de kapsamaktadır. Artan su tüketim miktarı ve oluşan atıksu miktarında ciddi ölçüde artış meydana gelmiştir (Hong vd. 2009). Oluşan atıksuların toplanması ve arıtılması süreçlerinin dahil edildiği bütünleşmiş yönetim sağlanarak, oluşabilecek çevresel etkilerinin azaltılması gerekmektedir. Bu bağlamda, atıksu arıtma tesisleri (AAT), atıksudaki zararlı maddelerin ve mikroorganizmaların çevreye deşarj edilmeden önce uzaklaştırılması için vazgeçilmez bir bileşen olarak şehir yaşantımızda yer almaktadır.

AAT'lerde uygulanan prosesler ile atıksudan kaynaklanan çevresel etkilerin azaltılması başarılı bir şekilde sağlanmakla birlikte, uygulanan prosesler sonucu kaçınılmaz bir yan ürün olarak arıtma çamurları oluşmaktadır (Buonocore vd. 2016). İklim değişikliği tehdidi, kaynak kıtlığı ve küresel sürdürülebilir kalkınma konuları günümüzde kritik bir öneme sahiptir (Dong vd. 2014; Liu vd. 2013). Bu kapsamda arıtma çamurlarının sürdürülebilir yönetimi; emisyonların ve kaynak tüketiminin azaltılması, çevresel etkilerin azaltılması ve verimliliğinin arttırılması anlamına gelmektedir (Dong vd. 2014).

Arıtma çamurları, yapısında bulunan su içeriğinin giderilmemesi durumunda yüksek hacimlere sahip olmasının yanı sıra patojenler, ağır metaller ve organik kirleticiler dahil olmak üzere birçok toksik kirletici içerebilir (Yang vd. 2020; Buonocore vd. 2016). Arıtma çamurlarına herhangi bir kurutma işlemi uygulanmadığı takdirde, arıtma çamurunun sahip olduğu katı madde (KM) içeriği, arıtma prosesine bağlı olarak %1-3 aralığında değişmektedir (Uggetti vd. 2009; Cleverson vd. 2007). %1-3 KM içeriğine bağlı olarak oluşan hacim, arıtılan atıksu hacminin %1-2'sini temsil ettiği bilinmektedir (Uggetti vd. 2009; Cleverson vd. 2007). Bununla birlikte, arıtma çamuru yönetimi; AAT'lerin toplam işletme maliyetlerinin %20-60'ını oluşturmaktadır (Uggetti vd. 2009; Cleverson vd. 2007).

Arıtma çamuru yönetimi, Avrupa Birliği (AB) tarafından düzenlenen Atık Direktifi (EC/2008/98) kapsamında, atık önleme ve yönetimi hakkındaki mevzuata göre, oluşan atıkların değerlendirilmesi standartlaştırılmıştır (EC, 2008). Bu kapsamda oluşturulan atık yönetim hiyerarşisi: 1. Önleme, 2. Yeniden kullanım, 3. Geri dönüşüm, 4. Diğer kazanım faaliyetleri, 5. Nihai bertaraf yöntemlerinin uygulanması olarak belirtilmiştir. Avrupa Birliği uyum süreci kapsamında arıtma çamuru yönetimi, çeşitli mevzuat ve yönetmeliklerin düzenlenmesi ile ülkemizde de uygulanmaktadır (Filibeli vd. 2022). Çamur yönetimi sürecinde uygulanan yöntemler yoğunlaştırma, susuzlaştırma, stabilizasyon, kurutma ve nihai bertaraf yöntemleridir (Tchobanoglous vd. 2003; Yapıcıoğlu ve Demir 2017).

Çamur hacmi azaltılması ve patojen giderimi ve arıtma verimliliğini sağlamak amacıyla çamur arıtma yöntemleri belli bir sırayla gerçekleştirilmelidir (Filibeli vd. 2022). Çamur yönetiminin ilk aşaması olan yoğunlaştırma amacıyla graviteli yoğunlaştırıcılar, santrifuj yoğunlaştırıcılar ve bantlı yoğunlaştırıcılar yaygın olarak kullanılmakta; susuzlaştırma sürecinde ise doğal ve mekanik susuzlaştırma yöntemleri

tercih edilmektedir. Çamurun stabilizasyonu amacıyla anaerobik ve aerobik çürütme ile kireç ilavesi en sık uygulanan yöntemlerdir. Stabilizasyonun ardından çamurun katı madde içeriğini nihai bertaraf yöntemleri için gerekli olan en yüksek katı madde içeriğine ulaştırmak amacıyla termal ve solar kurutma yöntemleri uygulanmaktadır. Nihai bertaraf yöntemleri olarak ise; yakma, piroliz, arazi uygulaması ve düzenli depolama seçenekleri uygulanabilmektedir (Tchobanoglous vd. 2003; Yapıcıoğlu ve Demir 2017).

Uygun arıtma yöntemleri seçilirken, bölgenin iklim koşulları, arazi yapısı, teknik imkanlar ve ekonomik durum dikkate alınmalıdır (Filibeli vd. 2022). Özellikle gelişmekte olan ülkeler için yan ürün olarak oluşan arıtma çamuru yönetimi mevzuat eksiklikleri, yüksek yatırım ve işletme maliyetlerinden dolayı halen bir zorluk olarak görülmektedir (Buonocore vd. 2016). Uygulanacak yöntem belirlenirken, arıtma çamurlarının arıtılması sırasında toplam tesis işletme maliyeti önemli bir etken olmaktadır (Uggetti vd. 2009; Cleverson vd. 2007; Alanya vd. 2015).

Yüksek miktarda nem içeren arıtma çamurlarını nihai bertaraf yöntemlerine hazırlanmak için zaruri olan uygulanan kurutma işlemleri yüksek miktarda enerji tüketilmesine ve dolayısıyla yüksek çevresel etkilere sebep olmaktadır. Sürdürülebilir bir atık yönetimi, ekonomik açıdan tüketilen kaynakların yaşam döngüsüne odaklanılması ve kaynak verimliliğinin sağlanması kayda değer bir tasarruf sağlayacak olup, başta sera gazı emisyonu olmak üzere ortaya çıkan çeşitli emisyonların ve oluşacak çevresel etkilerin azalmasına katkı sağlayacaktır (Filibeli vd. 2022). Bu doğrultuda, farklı ürün ve teknolojilere ilişkin süreçlerin çevresel etkilerinin belirlenmesi ve bu etkileri azaltmak amacıyla en uygun stratejiler geliştirilmesi için yaşam döngüsü analizi (YDA) çalışmaları yaygınlaşmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinde; atıksu arıtma yöntemleri ile arıtma çamuru hacim azaltma, kurutma ve bertaraf yöntemlerinin dahil olduğu yaklaşımları değerlendirmek ve en uygun yöntemi belirlemek için, YDA yaygın olarak kullanılan bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır (Corominas vd. 2013; Yoshida vd. 2013).

Dünyanın farklı ülkelerinde çevresel etkilerin belirlenmesi amacıyla çeşitli senaryoların uygulandığı atıksu ve çamur yönetimi çalışmaları literatürde yer almaktadır. Fakat, ülkemizde ve özellikle Akdeniz bölgesinde, uygulanan farklı arıtma çamuru kurutma teknolojilerinin çevresel etkilerinin değerlendirildiği bir çalışma literatürde yer almamaktadır. Bu çalışma ile en yaygın uygulanan arıtma çamuru kurutma yöntemlerine ait çevresel etkilerin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. En yaygın kullanılan çamur kurutma yöntemleri olan; bantlı kurutucu, akışkan yataklı kurutucu, döner kurutucu ve solar kurutma teknolojileri için farklı kaynak tüketimlerinin tercih edildiği senaryolar oluşturularak, yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimi ve kurutulmuş çamurun nihai katı madde içeriğinin azaltılmasına ilişkin YDA çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar ile, günümüzün vazgeçilmez bir sorunu olarak karşımıza çıkan iklim değişikliği konusunda, literatürü desteleyecek bir araştırma gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Yürütülen çalışmalar neticesinde, çevresel etkiler açısından en uygun çamur kurutma yönteminin belirlenmesi, tez çalışması kapsamında amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMASI

2.1. Arıtma Çamuru

2.1.1. Arıtma çamur kaynakları ve özellikleri

Arıtma tesislerinde gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler sonucu kaçınılmaz bir yan ürün olarak oluşan ve %95-99.5 oranında su içeren akışkan özelliğe sahip atıklar, arıtma çamuru olarak adlandırılır (Yıldırım 2015). Arıtma çamurları hem atıksu içerisinde bulunan katı maddelerden hem de arıtma hattı boyunca üretilen biyokütleden oluşmaktadır (Davis vd. 2010).

Çamur arıtma ve bertaraf yöntemleri, uygulanacak çamurun karakteristik özelliğine göre değişiklik göstermektedir (Filibeli 2009). Arıtma çamuru karakteristiği, çamur kaynağına, çamur yaşına, seçilen proses türüne ve çamurun besin maddesi içeriğine bağlıdır (Filibeli 2009). Arıtma çamurlarının sürdürülebilir yönetimi sadece hacim azaltılmasını değil aynı zaman da arıtma çamurlarından kaynaklanan çevresel etkilerin önlenmesi ile birlikte enerji ve materyal geri kazanımının sağlanmasını gerektirmektedir (Filibeli vd. 2018). Atıksu arıtma sisteminden kaynaklanan çamur ve katı atık kaynakları; ızgaralar, kum tutucu, havalandırma, ön çöktürme, biyolojik arıtma, son çöktürme ve çamur işleme üniteleri olup, bu ünitelerde oluşan çamur başlıca askıda katı madde, köpük, inorganik katı ve mikroorganizmalar içermektedir (Öztürk vd. 2005).

Biyolojik atıksu arıtımı uygulanan tesislerde ana çamur kaynağı, ön çöktürme ve son çöktürme havuzları olmaktadır (Filibeli 2009). Ön çöktürme havuzundan elde edilen ve çökebilir katılardan oluşan arıtma çamuru birincil çamur kaynağı olarak tanımlanırken, canlı mikroorganizmaların kullanıldığı aktif çamur ve benzer biyolojik proseslerin kullanılması sonucu oluşan arıtma çamurları ikincil çamur olarak adlandırılır (Turovskiy ve Mathai 2006). Birincil çamuru susuzlaştırmak biyolojik çamuru susuzlaştırmaktan daha kolay olmaktadır (Turovskiy ve Mathai 2006). Birincil çamurun katı madde (KM) içeriği %2-7 arası değişirken, ikincil çamurun KM içeriği %0.5-1.5 aralığında olmaktadır (Turovskiy ve Mathai 2006).

2.1.2. Çamur stabilizasyon ve bertaraf yöntemleri

Yoğunlaştırma ve susuzlaştırma işlemleri, arıtma çamuru KM içeriğini arttırmak, arıtılabilirliğini ve taşınabilirliğini iyileştirmek için kullanılmaktadır (Yoshida vd., 2013). Yaygın kullanılan yoğunlaştırıcılara örnek olarak yerçekimli yoğunlaştırıcı, çözünmüş oksijen flotasyonu ve yer çekimli bant yoğunlaştırıcı bulunmaktadır. Bu üniteler sayesinde KM içeriği %3-6 arasına çıkarılabilmektedir (Tchobanoglous vd. 2003). Santrifuj, bant filtresi ve çamur kurutma yatakları susuzlaştırma amacıyla kullanılmakta olup, üretilen çamur keki KM içeriği %10-30 arasına çıkarılabilmektedir (Tchobanoglous vd. 2003). Enerji ve polimer girdileri yoğunlaştırma ve susuzlaştırma teknolojilerinde bir çevresel yük olarak hesaba katılmaktadır. Enerji kullanımı seçilen yoğunlaştırma ve susuzlaştırma ekipmanına göre değişiklik göstermektedir (Yoshida vd. 2013).

Arıtma çamurunun stabilizasyonu kimyasal, biyolojik veya termal olarak sağlanabilir. En yaygın stabilizasyon uygulamaları, aerobik çürütme, anaerobik çürütme, kompostlaştırma ve kireç stabilizasyonudur (Houillon ve Jolliet 2005; Cartmell vd. 2006; Hong vd. 2009). Bu işlemler sırasında arıtma çamurunun dezenfeksiyonu da sağlanmaktadır (Alyanak 2010).

Anaerobik çürütme ortamda oksijen olmadan gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu işlem iki ana aşamada gerçekleşmekte olup, maddelerin ilk aşamada maddeler organik asitlere dönüştürülürken, ikinci aşamada ise organik asitlerin biyogaza dönüşmesi sağlanmaktadır (Ekinci 2019). Anaerobik çamur çürütme uygulaması çoğu patojenleri ortadan kaldırarak, çamurun zararsız hale getirilmesinde başarılı olmuştur (Mills vd. 2014).

*Aerobik çürütme*de ortama gerekli oksijen sağlanarak arıtma çamurunun biyolojik olarak stabilize edilmesi sağlanmaktadır. Aerobik sürecin işletilmesi için pH, oksijen (O_2) gereksinimi, sıcaklık, karıştırma süresi ve bekleme süresinin kontrolünün sağlanması gerekmektedir (Ekinci 2019).

Kompostlaştırma, işlemi en çevre dostu yöntemlerden biri olmasının yanı sıra uygulanan toprakta iyileştirici bir etki yaratmaktadır. Karbon/azot (C/N) oranı kompostlaştırma işlemi için önemli bir işletme parametresi olup, arıtma çamurunun C/N oranı 8-12 aralığında bulunmaktadır. Kompostlaştırma işlemi gerçekleştirilebilmesi için bu oranın 25-35 aralığında olması gerekmektedir. Bu yüzden arıtma çamurları tek başına değil, karbon (C) içeriği yüksek evsel organik atıklar ya da bitkisel atıklar ile kompostlaştırılması gerekmektedir (Alyanak 2010). Ayrıca, kompostlaştırma uygulanabilmesi için arıtma çamurunun KM içeriğinin kurutularak %40-60 aralığına getirilmesi gerekmektedir (Alyanak 2010). Bu yüzden çeşitli kurutma yöntemleri kullanılarak kompostlama için uygun ortam ve KM içeriği sağlanmalıdır.

Çeşitli çalışmalarda, kompostlaştırma işleminde kullanılması amacıyla arıtma çamurlarının %40 KM içeriğine ulaşması solar kurutma ile kolaylıkla gerçekleştirilmiştir. Solar kurutma sistemlerinin, termal kurutmaya göre çok ekonomik olması önemli bir alternatif olarak solar kurutma sistemlerini karşımıza çıkarmaktadır.

Kireç ile stabilizasyon, çamur içeriğinde bulunan sıvının katı maddeden ayrılmasına yardımcı olmaktadır. İşletilmesi sırasında pH değeri belli bir aralığa gelene kadar çamura kireç eklenir. Bu sayede hem zararlı mikroorganizmaların yok olması hem de kökü kokuların giderilmesi sağlanmaktadır (Ekinci 2019).

Kurutma, arıtma çamuru içerisindeki su içeriğinin buharlaştırılarak uzaklaştırılması ile gerçekleştirilir. Uygulanabilecek çamur kurutma yöntemleri olarak; termal kurutma, flaş kurutucular, çamur kurutma yatakları, akışkan yataklı kurutucular, ve solar kurutma teknolojileri bulunmaktadır. (Ekinci 2019).

2.1.3. Türkiye'de arıtma çamurlarına ilişkin yasal durum

Atıksulardan kaynaklanan çevresel etkileri azaltmak ve deşarj standartlarını sağlamak için atıksu arıtma tesislerinin işletilmesi önemli bir rol oynamaktadır. Evsel atıksuların arıtıldığı tesislerde genel olarak biyolojik atıksu arıtımı uygulanmakta olup,

arıtma sırasında çeşitli ünitelerden arıtma çamuru olarak adlandırılan biyokütle oluşmaktadır. Oluşan bu biyokütlenin yönetimi için ülkemizde ve Avrupa'da çeşitli yönetmelikler, tanımlamalar ve sınırlandırmalar bulunmaktadır.

Filibeli vd. (2022) tarafından belirtildiğine göre, 1986 yılında yayımlanan direktif (AB Çamur Direktifi) kapsamında evsel, kentsel ya da benzer özelliklere sahip arıtma sistemlerinde oluşan arıtma çamurlarını içeren geniş bir tanımlama yapılmış olup, ham arıtma çamuru ve stabilize arıtma çamurları tanımlanmıştır (Filibeli vd. 2022). İlave olarak, Bravo ve Ferrer (2011) tarafından belirtildiğine göre 1991 yılında yayımlanan direktif (AB Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi) kapsamında "kentsel atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru" tanımı endüstriyel atıksuları kapsamadığı sadece kentsel atıksuları kapsadığı ifade edilmektedir (Bravo ve Ferrer 2011).

Günümüze kadar uzanan süreç içerisinde ülkemiz de ulusal mevzuatlar ve yönetmelikler dahilinde çeşitli deşarj sınırlandırmaları ve nihai bertaraf uygulama yöntemleri için uygun koşullar belirtilmiştir.

9 Ağustos 1982 tarihli ve 18132 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren 2872 sayılı "*Çevre Kanunu"* 11. maddesi kapsamında "Üretim, tüketim ve hizmet faaliyetleri sonucunda oluşan atıklarını alıcı ortamlara doğrudan veya dolaylı vermeleri uygun görülmeyen tesis ve işletmeler ile yerleşim birimleri atıklarını yönetmeliklerde belirlenen standart ve yöntemlere uygun olarak arıtmak ve bertaraf etmekle veya ettirmekle ve öngörülen izinleri almakla yükümlüdürler" ifadesi yer almaktadır (TBMM 1982). Oluşan atıkların uygun olarak arıtılması ve bertaraf edilmesi amacıyla ilgili izinlerin alınması gerektiği belirtilmektedir (TBMM 1982). Aynı madde kapsamında 2020 yılında eklenen fıkra ile atıkların, doğal kaynak, hammadde kullanımının azaltılmasının ve geri kazanım faaliyetlerinin arttırılmasının esas alınması gerektiği belirtilmiştir (TBMM 1982).

31 Aralık 2004 tarihli ve 25687 Sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren *"Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği"* kapsamında atıksu arıtma tesisinde oluşan çamurun çevreyle uyumlu olarak yönetiminin sağlanması amacıyla kısa, orta ve uzun vadeli programları içeren arıtma çamuru yönetim planının oluşturulması gerektiği ilgili ifade yönetmeliğe ek olarak 17 Aralık 2022 tarihinde dahil edilmiştir. Yönetmelikte ilgili yönetim planlarının, döngüsel ekonomi ilkelerine uygun olarak tesisler tarafından hazırlanması ve bakanlıkça belirtilen usul ve esaslara uygun olarak düzenlenmesi gerektiği belirtilmiştir (ÇŞİB 2022).

8 Ocak 2006 tarihli ve 26047 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren *"Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği"* arıtma çamurları, AB Kentsel Atıksu Arıtım Direktifinde ifade edildiği gibi kentsel atıksuyun arıtılmasından kaynaklanan ham ve stabilize olmuş çamur olarak tanımlanmıştır. Yönetmeliğin ikinci bölümünde yer alan beşinci madde g bendi kapsamında uygun şartlarda kentsel atıksu arıtma tesislerinden elde edilen arıtma çamurlarının yeniden kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilecek her türlü toprakta kullanım veya bertaraf uygulamasının, Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde belirlenen standartlara ve yöntemlere uygun olarak yapılması gerektiği belirtilmiştir. Aynı yönetmelik maddesinin f bendi kapsamında; her türlü katı atık, arıtma çamurları ve foseptik çamurlarının alıcı su ortamlarına boşaltılmalarının yasak olduğu belirtilmiştir (ÇOB 2006).

Arıtma çamurları arıtıldıktan sonra depolanması söz konusu olabilir. 26 Mart 2010 tarihli ve 27533 Sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren "*Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik*" geçici madde 4 (Değişik: RG-26/12/2019-30990) kapsamında arıtma çamurlarının depolanmasına ilişkin aşağıdaki ifadeler yer almaktadır:

- "(1) Atık Yönetimi Yönetmeliğinin EK-4'ünde tehlikesiz olarak sınıflandırılan arıtma çamurlarının, Ek-2'de verilen diğer tüm parametreleri sağlaması, sınır değer artırımı yapılmaması, ağırlıkça en az %50 kuru madde ihtiva etmesi ve kötü kokunun giderilmesi kaydıyla II. sınıf düzenli depolama tesisinde ayrı bir lotta depolanmasında 1/1/2025 tarihine kadar Çözünmüş Organik Karbon limit değerine uygunluk aranmaz."

- "(2) Bu maddenin birinci fıkrasına ilave olarak, aşağıdaki sınır değerler de karşılanmak zorundadır: a) Ek-2 Atık Kabul Kriterleri, 2-A) İnert Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri III. sınıf depolama tesisleri için sınır değerler altında yer alan TOK (Toplam organik karbon) değeri, arıtma çamurları için; ilave sınır değer artırımı yapılmaksızın 1/1/2025 tarihine kadar azami 250.000 mg/kg alınır; b) Ek-2 Atık Kabul Kriterleri, 2-B) Tehlikesiz Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri, reaktif olmayan ve kararlı tehlikeli atıkların II. sınıf depolama tesislerine kabul edilebilmesi için sınır değerler altında yer alan TOK (Toplam organik karbon) değeri, arıtma çamurları için; ilave sınır değer artırımı yapılmaksızın 1/1/2025 tarihine kadar azami 250.000 mg/kg alınır."

3 Ağustos 2010 tarihli ve 27661 Sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren "*Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik*" kapsamında ise, ham çamur ve stabilize çamur tanımları yapılmış olup, ilgili yönetmeliğin ikinci maddesi kapsamında "Bu Yönetmelik, evsel ve kentsel atıksuların arıtılması sonucu ortaya çıkan arıtma çamurlarının toprağa, bitkiye, hayvana ve insana zarar vermeyecek şekilde, toprakta kontrollü kullanımına ilişkin teknik ve idari esasları kapsar." ibaresi belirtilmiştir. İlgili yönetmeliğin beşinci maddesi kapsamında, ham arıtma çamurunun toprakta kullanılmasının yasak olduğu ifade edilmiş olup, altıncı maddesinde ise stabilize edilmiş arıtma çamurunun toprakta kullanılabilmesi için hem ağır metal içeriğine hem de organik bileşik ve mikrobiyolojik analizine dair limit değerleri tanımlanmış ve %40 altında organik madde içeriğine sahip stabilize arıtma çamurlarının toprağa uygulanamayacağı belirtilmiştir. Yönetmeliğin altıncı maddesi birinci fıkrasında yer alan o bendinde, "Kapasitesi bir milyon eşdeğer nüfusun üzerinde olan tesislerde oluşan arıtma çamurlarının en az %90 kuru madde değerine kadar kurutulması esastır. Ancak arıtma çamuru üreticileri %90 kuru madde değerine ulaşmadan kullanımının teknik ve ekonomik açıdan uygun olduğunu belgelemesi durumunda Bakanlıkça %90 kuru madde değerine ulaşması şartı aranmaz." ibaresi belirtilmiştir (ÇOB 2010).

20 Haziran 2014 tarih ve 29036 Sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren "*Atıktan Türetilmiş yakıt, ek yakıt ve alternatif hammadde tebliği*" 12. Maddesi kapsamında ise "arıtma çamurlarının ek yakıt olarak kullanılabilmesi için en fazla %50 nem içerecek şekilde kurutulmuş halde tesise gelmesi ya da tesiste kurutma ünitesinin bulunması zorunludur." ibaresi bulunmaktadır. (ÇŞB 2014).

02 Nisan 2015 tarihli ve 29314 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren "*Atık Yönetimi Yönetmeliği*" eklerinde yer alan Tehlikeli Atık Eşik Konsantrasyonları Kapsamında yapılacak analizlere bölümünde arıtma çamurlarına ilişkin olarak "(3) Arıtma çamurlarına yapılacak analizlerde arıtma çamuru numunesinin analiz sonucu %50 kuruluk seviyesine ve sınır değerlere göre değerlendirilir." İfadesi yer almaktadır (ÇŞB 2015).

Söz konusu ulusal mevzuat hükümlerine göre, arıtma çamurlarının faydalı kullanımı için stabilizasyon, kurutma ve nihai bertaraf içeren süreçlerin belirtildiği arıtma çamuru yönetim planlarının oluşturulması ve uygun arıtma teknolojilerinin kullanılması gerekmektedir.

2.2. Arıtma Çamuru Kurutma Yöntemleri

Arıtma çamuru kurutulması işleminde, nem içeriğinin buharlaşarak uzaklaştırılmasının yanı sıra etkili bir dezenfeksiyon sağlanabilmektedir (Filibeli vd. 2022). Enerji tüketimi, verimlilik ve arazi kullanımına bağlı en yaygın olarak kullanılan arıtma çamuru kurutma yöntemleri, termal kurutma ve solar kurutmadır.

2.2.1. Termal kurutma

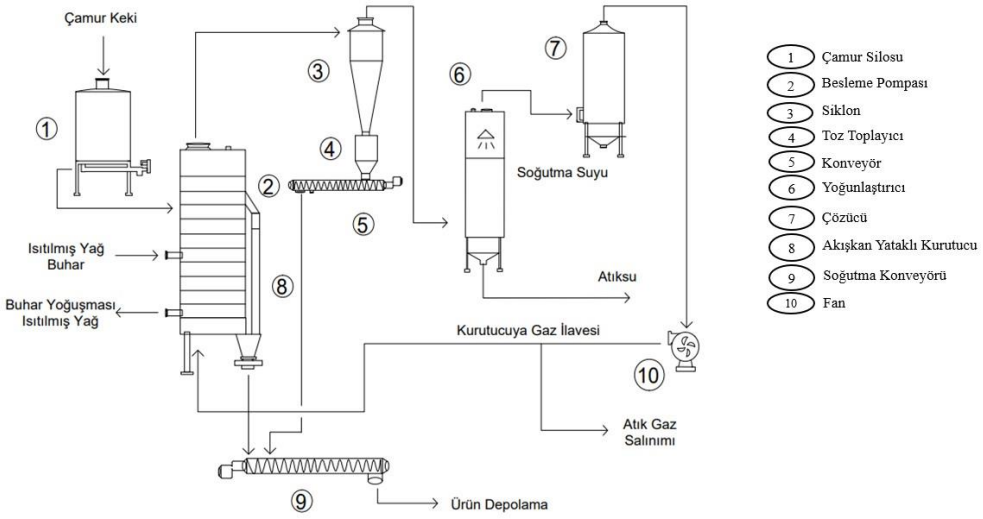
Termal kurutma uygun sıcaklık sağlandığı takdirde çamur kurutma işlemi olarak uygulanabilmektedir. İlk yatırım ve işletme maliyetleri ile birlikte enerji ihtiyacı yüksek olan bir sistemdir. İlk yatırım maliyetleri, kapasite ve kullanılan ekipmana göre değişiklik gösterebilmektedir (Salihoğlu ve Orakçı 2016). Arıtma çamuru bertaraf yöntemleri arasında yer alan, çimento fabrikalarında çamurun yakılarak değerlendirmesi için arıtma çamuru %90 KM içeriğine kadar kurutulmalıdır. Elde edilen son ürünün %70-90 KM içeriğine sahip olduğunda, çamur patojen olmayan toprak besi maddelerini bünyesinde barındırmaya devam etmektedir (KAMAG 2013). Bu KM içeriğine ulaşabilmek amacıyla kullanılan termal kurutma sistemleri yüksek enerji tüketimine yol açmaktadır (Alyanak 2010; Lei vd. 2009).

Termal kurutma uygulamalarında, ısı kaynağı çamura doğrudan ya da dolaylı olarak iletilmektedir. Yüksek sıcaklıktaki gaz ile çamurun temas etmesi sonucu doğrudan kurutma işlemi uygulanmış olurken, çamurun ısıtılmış bir yüzeye teması ile nem içeriğinin dolaylı kurutma ile giderilmesi sağlanmaktadır.

Doğrudan ısıyla dönen kurutucu çoğunlukla yüksek viskoziteli ve yüksek su içeriğine sahip malzemeleri kurutmak için tercih edilmekte olup, yakma bölümünde 800 °C'ye kadar ısıtılan sıcak hava, doğrudan kurutmada kullanılmaktadır (Kasakura vd. 1993). Çok ocaklı fırın çok iyi ısı transferi özelliklerine sahip olmamasına ve yüksek enerji tüketimine rağmen, kompakt boyutu birçok ünitenin arıtma çamuru yakma işleminde kullanılmasını sağlamıştır (Kasakura vd. 1993). Süreç içerisinde susuzlaştırma sürecinde ek kimyasal olarak kullanılan demir klorür ($FeCl_3$) ve/veya kireç yerine polimer kullanılmasının tercih edilmesi çok ocaklı yakma fırınında çamur kurutma ve yakma işlemlerinin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Oluşan bu dezavantaj zaman içerisinde akışkan yataklı çamur kurutucuların ortaya çıkmasına yol açmıştır (Van't Land 2011; Kasakura vd. 1993).

Akışkan Yataklı kurutucular, sahip oldukları tasarımlarına göre derin yataklı dairesel ve dikdörtgen olmak üzere farklı tasarımlarda olabilirler (Van't Land 2011). Elekli bir silindir içerisine belli bir yükseklikte yerleştirilen toz kümesinin durağan bir halde bulunması, durağan yatak olarak adlandırılır (Rengin 2017). Toz kümesinin, silindir tabana uyguladığı basınca karşılık, tozları askıda tutmak için silindir tabanından yeterli basınçta hava gönderilmesi sonucu, toz yatağı yükseklik kazanmakta ve gözenekliliği yüksek bir yatak haline gelerek akışkan yatağı oluşturmaktadır (Rengin 2017). Sağlanan bu ortamda karışma ve ısı transfer hızlarının çok yüksek olduğu bilinmekte olup, üst kısımdan girişi sağlanan arıtma çamuru hava yardımıyla hızlı bir şekilde kurutularak alt kısımda yer alan bir noktadan yüksek sıcaklık değişikliklerinden etkilenmeden kurutulmuş bir şekilde çıkmaktadır.

Sistemdeki en büyük farklılık diğer sistemlerdeki gibi ısı alışverişini sağlamak için arıtma çamurunun herhangi bir yüzeye serilmesine gerek kalmadan serbest olarak akmasıyla sağlanmaktadır (Rengin 2017). Bu sayede işlem süresi oldukça kısa sürmektedir. Sisteme giren çamur ya da işlem sırasında parça kopmalarından dolayı çıkış gazıyla birlikte küçük boyutta katılar sürüklenebilir. Bu yüzden, akışkan yataklı sistemlerde kaçan katıları tutmak için siklon veya torbalı filtre gibi kısımlar bulunmaktadır (Rengin 2017). Akışkan yataklı sistemlerde suyu buharlaştırmak için gerekli ısı taşınımı, termal yağ borularının sıcak yüzeylerinden sağlanmaktadır. Isıtılan termal yağ aracılığıyla sağlanan ısı aktarımı ile ısıtılan hava, akışkan yatak sistemi içerisinde kurutma işlemini gerçekleştirmektedir (Rengin 2017). 150-200 °C' aralığında çalışma sıcaklığı mevcuttur. Akışkan yataklı kurutucu sistemine ait akış diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

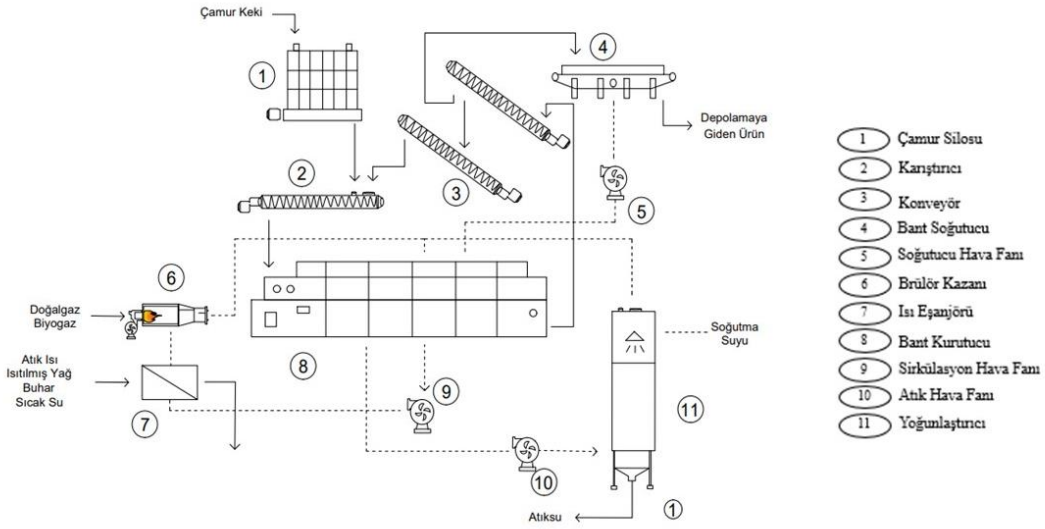


Şekil 2.1. Akışkan yataklı kurutucu sistemine ait akış diyagramı (Anonim 2)

Bantlı kurutucular, temel olarak kapalı bir kabin içerisinde yer alan hareketli taşıyıcı bant sisteminin kullanılması esasına dayanmaktadır. Arıtma çamuru, bant üzerine homojen bir şekilde yayılır ve kurutma bölümüne iletilir. Isı aktarımı göz önüne alındığında, çelik malzemelerden üretilmiş bantlar tercih edilmektedir. Kurutma

bölmelerinde sıcak hava, bandın alt ve üst tarafında yer alan kanallardan çamur üzerine yönlendirilir. Bu noktada, kurutucuda uygulanacak sıcaklık ayarlanabilmektedir (Rengin 2017). Kurutma sırasında sıcak hava, harici bir kazanda hazırlanır. Yakıt olarak katı, sıvı, gaz yakıtlar ve biyokütle kullanılabilir. Kurutma işlemi sırasında kullanılan hava içerisinde nem miktarı yüksek değilse tekrardan sistemde kullanılması sağlanarak ısı ve enerji tasarrufu sağlanabilir.

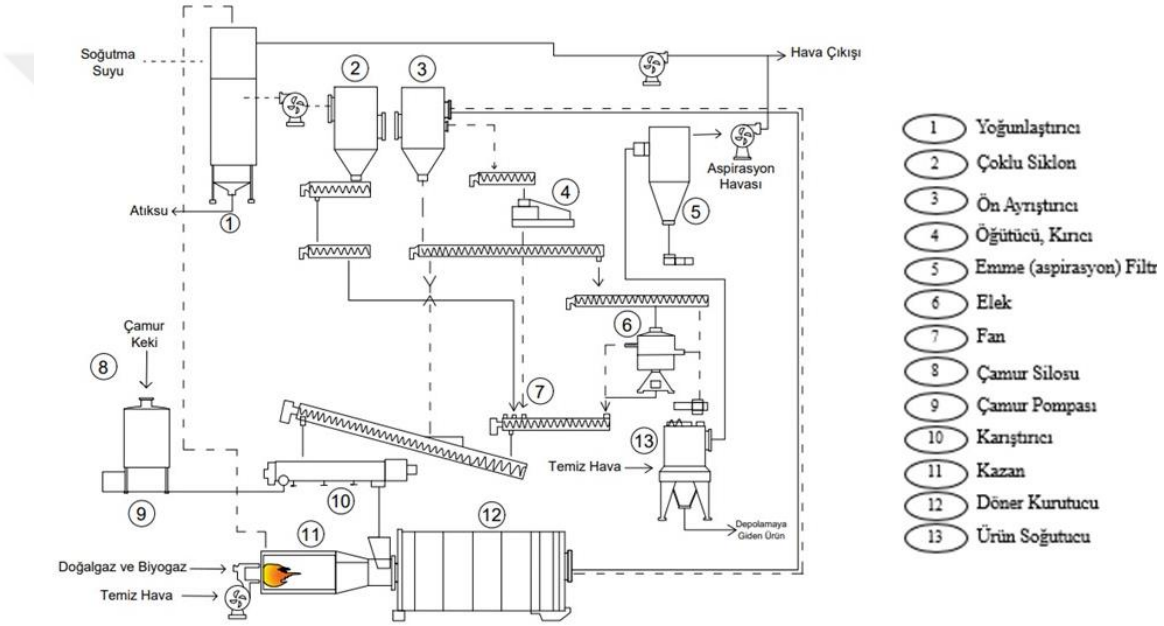
Bantlı kurutma sistemlerinde kurutma kapasitesi, bant uzunluğunu ya da kat sayısını arttırarak sağlanabilir. Genellikle çok katlı bant kurutucular kullanılır. Üst bant aracılığıyla sisteme giren çamur, bant sonunda altta yer alan bant üzerine dökülür ve ters yönde hareketini sürdürür. Kurutma süresinin az olması için bant üzerine dökülen çamur kalınlığının düşük olması ve en uygun bant hızının sağlanması gereklidir. Üst bant için çamur yüksekliği, 50 ila 90 mm arasında değişmektedir. Optimum şartları sağlamak için üst bant hattına beslenen çamur yüksekliği, alt bant ortasındaki çamur yüksekliğinin 2 katı kadar olmalıdır. Enerji verimliliği ve su buharlaştırma kapasitesi için üst bant, alt banttan iki kat hızlı çalıştırılmalıdır. 150 °C'den düşük sıcaklıklarda işletme imkânı ve sistem içerisindeki düşük toz içeriği ile emniyetli işletme koşulları oluşmaktadır (Rengin 2017). Uygulanan çamur tabakasının yüksekliğine bağlı olarak %65-95 KM içeriği elde edilebilmektedir. Bantlı kurutucular; esnek, işletmesi kolay ve güvenilir sistemlerdir (Rengin 2017). Bantlı kurutucu sistemine ait akış diyagramı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Bantlı kurutucu sistemine ait akış diyagramı (Anonim 2)

Döner kurutucular, işletilmesi ekonomik ve kolay sistemlerdir. Bu tip kurutucu yatay düzlem ile belli bir açı yapacak şekilde yerleştirilmiş silindirik bir yapıya sahip gövdeden oluşmaktadır (Rengin 2017). Eşit aralıklar ile tambur içerisine yerleştirilmiş bölümler ile dönme hareketi ve kurutucu gaz akımı sayesinde kurutma işlemi gerçekleştirilir. Tasarım aşamasında tambur uzunluğu, çapın 8-10 katıdır (Sapmaz 2022). Dönme işlemi ise dişli ya da zincir sistemi ile sağlanır ve 0.2-0.5 m/s çevresel hız değeri olacak şekilde dönme devir sayısı ayarlanır (Dinçer ve Zamfirescu 2015). Kurutucu içerisinde belirli mesafelerde yerleştirilmiş kürekler yardımıyla karıştırma

gerçekleştirilir (Sapmaz 2022). Akışkan yataklı kurutucular gibi çamur girişi döner sistemin yüksek ve üst kısmından sağlanırken, kurutulan çamur alt kısımdan sistemden uzaklaştırılır. Ürün ve kapasite açısından işletme esnekliğine sahip sistemlerdir (Sapmaz 2022). Döner kurutma sistemlerinde gaz akımının sıcaklığı girişte yüksek olmasına rağmen, çamur yüzeyinde gerçekleştirilen kurutma aşamasında gaz sıcaklığı hızlı bir şekilde düşmektedir (Rengin 2017). Isı transferini sağlamak amacıyla kullanılan yakıt; katı, sıvı, gaz yakıtlar ve biyokütledir (Sapmaz, 2022). Arıtma çamuru yapısı gereği kuruma hızının düşük olması muhtemeldir. Bu tip durumlarda kurutulan çamurun belli bir kısmı sisteme yeni çamur ile tekrardan beslenir (Sapmaz 2022). Uygun tasarımın kurutma ortamı için sağlanmasıyla atık ısı kaynaklarının geri kazanımı gerçekleştirilebilir (Sapmaz 2022). Döner kurutucular sahip olduğu avantajları nedeniyle yaygın kullanılan kurutma sistemidir (Sapmaz 2022). Konvansiyonel tip döner kurutucuya ait akış diyagramı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Konvansiyonel tip döner kurutucu sisteme ait akış diyagramı (Anonim 2)

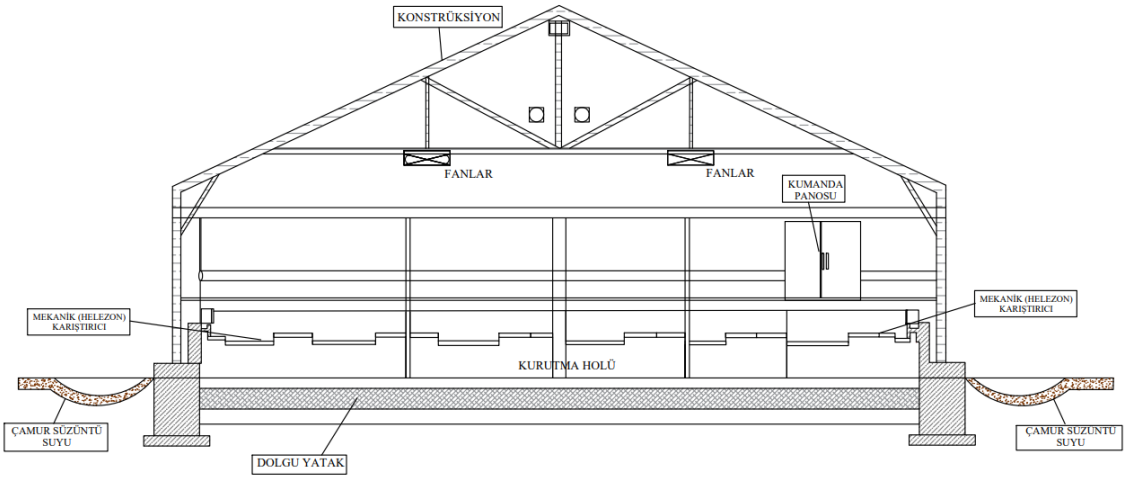
İşletme aşaması, atık kabul alanından döner kurutucuya çamur beslemesi yapılmasıyla başlamaktadır. Yakma fırınında elde edilen ısı, fanlar ile kurutma tamburuna yönlendirmekte kurutma işlemi neticesinde siklondan geçirilerek partiküller tutulmaktadır. Kurutucu ünitesi; ocak, ateş tuğlası, döner emiş siklonları ve emiş fanlarından oluşmakta olup kurutucu ünitesinde 1 adet baca bulunmaktadır. Cehennemlik olarak adlandırılan bölüm, kurutucunun ocak bölümünü oluşturmakta olup ihtiyaç duyulan ısıyı sağlamak için kullanılır. Susuzlaştırılmış çamur, helezon yardımıyla besleme ağzına taşınır ve döner kurutucuya beslenir. Beslenen çamur ve ısıtılan hava birlikte dönüş hareketini gerçekleştirir ve elde edilen yüksek sıcaklık yardımıyla arıtma çamurunun içeriğinde bulunan su buharlaştırılarak yüksek emişli fanlar aracılığıyla uzaklaştırılır.

Tamburların dönme hızlarındaki değişim, oluşan film tabakasının kalınlığı, sistemin sıcaklığı, tambur kurutucuların performansını etkileyen temel faktörler olarak yer almaktadır (Rengin 2017).

Flaş kurutucular, olarak bilinmekte olan pinomatik kurutucular 1930'lu yılların başından beri kullanılmaktadır. Temel olarak, bir flaş kurutucu, bir gazı yüksek hızda taşıyan uzun bir tüp veya kanaldan, gazı itmek için bir fandan, gaz akışına partikül katıların eklenmesi ve dağıtılması için uygun bir besleyiciden ve bir siklon toplayıcı veya diğer ayırma ekipmanından oluşur (Van't Land 2011). Flaş kurutma ekipmanı basittir, az yer kaplar ve az sayıda hareketli parçaya sahiptir. Tipik gaz çıkış hızları 10 ila 30 m/s aralığındadır. Dolayısıyla, flaş kurutma gaz hızları, döner ve akışkan yataklı kurutuculardaki hızların yaklaşık 10 katı kadardır. Kurutulabilen maksimum partikül boyutu 1 ila 2 mm'dir, çünkü daha büyük partiküller hava ile sürüklenmez. Döner kurutucuların aksine hızlı kurutucu, malzeme yüksek besleme hızlarında taşınamadığı için aşırı yüklenmeye karşı hassastır. Sonuç olarak, flaş kurutucular, döner kurutuculardan daha fazla dikkat gerektirir (Kasakura vd. 1993).

2.2.2. Solar kurutma

AAT'ler de çamur hacminin azaltılması amacıyla yaygın olarak yüksek enerji talebi olan termal kurutma yöntemleri uygulanmakta olmasına rağmen, iklim koşullarının uygun olması durumunda çamur kurutma amacıyla güneşten faydalanılması çamur kurutma için önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Solar kurutma ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinden yararlanmak ve çevre yatırımlarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşmasını sağlamak amacı ile kullanılabilir bir işlemedir (Salihoğlu ve Pınarlı 2007). Solar çamur kurutma tesislerinde işletme maliyeti düşük olmasına rağmen en büyük sorun kaynağı ihtiyaç duyulan alan gereksinimidir (Salihoğlu ve Orakçı 2016). Elbette ilk yatırımın gerçekleştirilmesi amacıyla sağlanması gereken temel ekipmanlar bulunmaktadır. Solar kurutma için oluşturulan sera kapsamında; çamur yatağı sirkülasyon fanları, taze hava giriş menfezi, yoğun hava transfer fanları, doymuş havayı tahliye fanları, karıştırıcılar, iklimlendirme sistemleri, güneş ışığının yetersiz olması durumunda kullanılmak üzere ek ısı kaynağı, sera taban inşası, elektrik ve kablolama aşamaları, yangın ve koku kontrol sistemi ilk yatırım ekipmanlarından oluşturmaktadır (Salihoğlu ve Orakçı 2016; Ekinci 2019). Solar çamur kurutma yöntemi ile kurutulan çamurun, hem depolama sahalarında örtü malzemesi olarak kullanılması mümkün olduğu hem de işletme maaliyeti ile sağladıkları olumlu çevresel etkileri için tercih edilen bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Salihoğlu ve Orakçı 2016; Alyanak 2010). Solar kurutmaya ait akış diyagramı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Solar kurutmaya ait akış diyagramı (Anonim 1)

Sayılgan ve Ünlü (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışma, farklı iklim koşullarında Isparta AAT'den elde edilen arıtma çamurunun, solar sistemde kurutulması üzerine gerçekleştirilmiştir. İklim koşullarında gerçekleşen değişikliklerin, çamur susuzlaştırma ve toplam katı madde miktarlarına olan etkisi araştırılmıştır. Özellikle kış döneminde %90 KM içeriğine ulaşmak için 15-20 gün kurutma süresine ihtiyaç duyulurken, yaz dönemlerinde 5 gün kurutma süresinin %90 KM içeriğine ulaşmak için yeterliği olduğu tespit edilmiştir (Sayılgan ve Ünlü 2021). Solar kurutma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çamur kurutma işlemlerinde enerji tasarrufu sağlanabilmekte ve diğer geleneksel çamur termal kurutma sistemlerine kıyasla işletme maliyetleri azalabilmektedir (Lei vd. 2009). Elbette arıtma çamurunun Çevre ve Şehircilik Bakanlığından Lisanslı Çimento Fabrikalarına ek yakıt olarak gönderilmesi için solar kurutma sistemler ile %90 KM içeriğine ulaşması için kış aylarında bekleme süresinin uzun olması, sistemin bir dezavantajı olarak görülmekte ve ortam sıcaklığını sabit tutabilmek için çeşitli ısıtma teknikleri ile düzenlemeler yapılması gerektiği belirtilmektedir (Sayılgan ve Ünlü 2021).

2.2.3. Çamur kurutma yöntemlerinin karşılaştırılması

Yukarıda özetlenen çamur kurutma yöntemlerinin özellikleri doğrultusunda bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi, her bir çamur kurutma yöntemi farklı avantaj ve dezavantajlar taşımakla birlikte solar kurutma teknolojisi, enerji tasarrufu bakımından öne çıkmaktadır. Enerji tasarrufunun yanında, personel ihtiyacının az olması ve işletim kolaylığı, tercih edilebilir bir kurutma yöntemi olarak solar kurutmayı ön plana çıkarmaktadır.

Akışkan yataklı kurutucular, gözenekliliği yüksek bir akışkan yatağın oluşmasıyla birlikte çok yüksek karışma ve ısı transfer hızlarına sahiptir. Kurutma süresinin kısa olması avantajları arasında yer almaktadır. Sistem oluşan atık ısı, düşük sıcaklıkta sistemden uzaklaştırıldığı için, geri kazanımda kullanılamaz. Çıkış gazıyla birlikte, sisteme giren çamurdan kopan küçük boyutta katıların sürüklenmesi, akışkan yataklı kurutucuların dezavantajı olarak yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Çamur kurutma yöntemlerinin karşılaştırılması

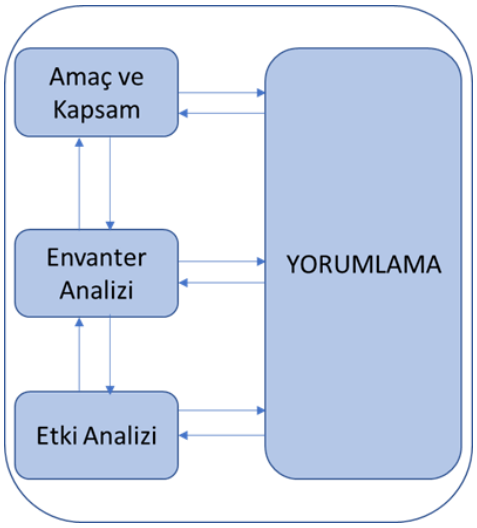
Çamur Kurutma Yöntemi	Avantaj	Dezavantaj
Akışkan yataklı kurutucu	Toz yatağı yükseklik kazanmakta ve gözenekliliği yüksek bir yatak haline gelerek akışkan yatağın oluşmasıyla sağlanan bu ortamda karışma ve ısı transfer hızlarının çok yüksek olmasına bağlı olarak kurutma süresi kısadır. Farklı yoğunlukta ürünler kurutulabilir. Isı transferini sağlamak amacıyla farklı yakıt türleri kullanılabilir (katı, sıvı, gaz yakıtlar ve biyokütle).	Sistemde oluşan atık ısı, düşük sıcaklıkta verildiği için, kurutma işleminde tekrar kullanılamaz. İşletme sıcaklığı yüksek olduğundan soğutma için ilave yöntemler uygulanmalıdır. Sisteme giren çamur işlem sırasında parça kopmalarından dolayı çıkış gazıyla birlikte küçük boyutta katılar sürüklenebilir. Bakım işlemi sadece teknik sahasında yapılabilir.
Bantlı kurutucu	Kurutma kapasitesi, bant uzunluğunu ya da kat sayısını arttırılarak arttırılabilir. Tesis içerisinde oluşan atık ısı, sistemde tekrar kullanabilir. 150 ° C'den düşük sıcaklıklarda işletilir. Kurutma süresi kısadır. Toz oluşumu, diğer kurutma teknolojilerine göre düşüktür. Kurutma teknolojisine ait ekipmanların aşınma süreleri, diğer kurutma teknolojilerine göre düşüktür. Gerçekleştirilecek bakım çalışmaları, yerinde yapılabilir.	İlk yatırım maliyeti yüksektir. İşletme maliyeti, termal enerji tüketimine bağlı olarak yüksektir. Kapat-aç yapılması enerji tüketimini arttıracağı için, sistem sürekli çalıştırılmalıdır.
Döner kurutucu	Ürün ve kapasite açısından işletme esnekliğine sahiptir. İşletilmesi kolaydır. Isı transferini sağlamak amacıyla farklı yakıt türleri kullanılabilir (katı, sıvı, gaz yakıtlar ve biyokütle). Atık ısı kaynaklarının bir kısmı geri kazanılabilir.	Gaz akımı sıcaklığı girişte yüksek olmasına rağmen, çamur yüzeyinde gerçekleştirilen kurutma aşamasında gaz sıcaklığı hızlı bir şekilde düştüğü için, ısının bir kısmı atık ısı olarak atmosfere salınır. Dönme sırasında oluşan toz ve yüksek ısı sebebiyle patlamalar meydana gelebilir. Enerji maliyeti yüksektir.
Solar Kurutma	Sistemin işletilmesi, diğer termal kurutma teknolojilerine göre kolaydır. Kurutma için herhangi bir termal enerji tüketimi yoktur. Sistemin elektrik tüketimi, çok düşüktür. Bazı mekanik parçaların yağlanması, bakım çalışmaları için yeterli olup, bakım ve işletme masrafları düşüktür. 40 – 60 °C çalışma sıcaklığı yeterli olup, harici soğutma ihtiyacı yoktur. Atık ısı oluşması durumunda, solar kurutma teknolojisine kolaylıkla entegre edilebilir	Sistemin, kurutma için alan ihtiyacı fazladır. Patojen giderimi konusundaki etkinliği azdır. Koku problemi bulunmaktadır.

Bantlı kurutucular, kurutma sürelerinin kısa olması ve tesis içerisinde oluşan atık ısının bantlı kurutucuda tekrar kullanılması, en büyük avantajları arasında yer almaktadır. Ayrıca toz oluşumunun diğer kurutucu teknolojileri göre daha az olması ve kurutma ekipmanlarının aşınma sürelerinin daha uzun ömürlü olması, avantajları arasında yer almaktadır. Sahip olduğu bu avantajlara rağmen, ilk yatırım maaliyetinin yüksek olması ve sistemin kapat-aç yapılması, enerji tüketimini arttıracağı için sistemin sürekli olarak çalıştırılması gerekmektedir.

2.3. Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) Metodolojisi

Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), üretim ya da hizmet süreçlerinin çevresel etkilerini analiz etmek için yayın olarak kullanılan yöntemlerden biridir (ISO 2006). YDA kavramı ilk olarak 1960'larda ve 1970'lerde endüstriyel ürünleri değerlendirmek için geliştirilmiş ve sürdürülebilir tüketiciliğin yükselişiyle birlikte uygulama alanı 1980'den 1990'a kadar genişletilmiştir (Guinée vd. 2011). Hammadde eldesinden başlayarak, bertaraf edilene kadar geçen süreç içerisinde girdi ve çıktıların derlendiği, kaynak ve enerji verimliliği çalışmalarının temelini oluşturacak zemini hazırlayarak, çevresel etkileri azaltacak stratejileri belirlemede yol gösterici bir yöntemdir (ISO 2006).

Elde edilen veriler ile gerçekleştirilen YDA'nın hem çevresel hem de ekonomik yatırımlar için karar alma sürecine yardımcı olması beklenmektedir (Yang vd. 2020). Sürdürülebilirlik planları hazırlanmasında yol gösterici olması; risklerin ve potansiyel yükümlülüklerin yönetilmesi açısından avantajlar sağlamaktadır. Atıksu ve çamur yönetimi için gerçekleştirilen YDA çalışmalarına ilgi son yıllarda artmıştır (Corominas vd. 2013; Yoshida vd. 2013). Arıtma çamuru arıtma ve bertaraf süreçlerini içeren arıtma çamuru yönetim sisteminin genel çevresel etkilerini belirlemek ve arıtma sistemleri arası farkları değerlendirmek için YDA kullanılmaktadır (Corominas vd. 2013; Yoshida vd. 2013; Abuşoğlu vd. 2017). 4 aşamadan oluşan YDA, ISO 14040 standart prosedürünü takip etmekte olup Şekil 5'te gösterilmiştir. (ISO 2006). Amaç ve kapsam belirlenmesi, envanter analizi, etki analizi ve sonuç yorumlaması olarak değerlendirme süreci gerçekleştirilir (ISO 2006).



Şekil 2.5. YDA metodolojisi aşamaları

2.3.1. Amaç ve kapsam belirleme

Amaç, bir hizmetin işletilmesi ya da üretimi sırasında hedef kitlenin tanımlanması ve hangi ekonomik veya sosyal faydaların sağlanacağının belirlendiği aşamadır (ISO 2006).

Kapsam belirleme adımı ise, hangi süreçlerin ve hangi çevresel kaygıların dahil edileceğinin belirlenmesini içerir (ISO 2006). Amaç ve kapsam belirleme aşaması değerlendirme, yorumlama ve karşılaştırmayı sağlıklı bir şekilde yapabilmek için ilk adımı oluşturmakta olup teknik sorunları çözmeyi ve YDA için tanımlanan hedef kitle için sistem sınırlarını belirlemeyi sağlar (ISO 2006).

2.3.2. Envanter analizi

Fonksiyonel Birim, amaç ve kapsam belirlendikten sonra değerlendirme yapılacak olan hizmet ya da ürün için belirlenmesi gereken önemli bir unsurdur. Özellikle çevresel yüklerin farklı senaryolar için değerlendirilmesini kolaylaştırmak için envanter oluşturmadan önce belirlenmesi gerekmektedir (ISO 2006).

Envanter, belirlenen fonksiyonel birime göre düzenlenerek, bir sistemin tüm parçalarından tüm çevresel girdiler ve çıktılar hakkında bilgi sağlar. Girdiler tüketilen ham madde, kimyasal ve enerji tüketimini içerirken; çıktılar hava emisyonunu, katı atıkları, su ve atıksu emisyonlarını içerir (ISO 2006).

2.3.3. Etki analizi

Oluşturulan envanter verilerinin, çeşitli etki değerlendirme metodolojileri yardımıyla etki analizi gerçekleştirilir ve her bir etki kategorisi için yorumlanabilir göstergelere dönüştürür (ISO 2006). Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA) uygun etki kategorilerinin seçilmesi, temel akışların atanması, karakterizasyon adımları ile opsiyonel olarak, normalleştirme, gruplandırma ve ağırlıklandırma adımlarından oluşur (Nieuwlaar 2013). ReCiPe, TRACI, CML, IMPACT 2002+ gibi çeşitli etki analizi metodolojileri bulunmakta olup, bu metodolojiler ile seçilen fonksiyonel birim için küresel iklim değişikliği, ozon tabakası incelmesi, insan toksisitesi, ötrofikasyon, asidifikasyon gibi çevresel etkiler hesaplanmaktadır (Guinée 2002; Jolliet vd. 2003). Üzerinde mutabık kalınan bir etki kategori listesi var olmadığı için, genellikle atık yönetimi ile ilgili olduğu düşünülen küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon, ötrofikasyon, ozon tabakası incelmesi ve fotokimyasal ozon oluşumu kategorileri arıtma çamurları değerlendirmesi için tercih edilmektedir (Righi vd. 2013). Farklı etki kategorileri için birbirinden farklı YDA yaklaşımları ve yazılımlar kullanılarak analiz gerçekleştirilebilmektedir (Yapıcıoğlu ve Demir 2017).

YDEA yöntemleri orta nokta ve son nokta olmak üzere iki farklı yaklaşımı benimser. Orta nokta yöntemi, neden-sonuç zincirinin ortasında yer alan kategorileri, bunların insan sağlığı veya çevresel zararlar gibi nihai zararlarını hesaplamadan kapsar. Uç nokta yöntemi ise orta nokta etki kategorilerini, daha spesifik insan ve ekosistem hasarı kategorilerine dönüştürerek bunu bir adım daha ileri götürür (Patel ve Singh 2022). Orta nokta ve uç nokta yöntemleri, YDEA'ya uygulanan özel yaklaşımlardır.

Yürütülen çalışmalara göre, IPCC (Hükümetler arası iklim değişikliği paneli), Ecoinvent, CML ve IMPACT 2002+ en yaygın olarak kullanılan veri setleri ve etki analizi faktörleridir (Suh ve Rousseaux 2002; Hospido vd. 2004; Gallego vd. 2008; Pasqualino vd. 2009; Yoshida vd. 2013). Küresel ısınma potansiyeli, etki kategorileri içerisinde en sık gözlemlenen kategori olarak yer almaktadır (Yoshida vd. 2013; Yapıcıoğlu ve Demir 2017). Bu aşama, YDA standardının en önemli adımını oluşturmaktadır (Yapıcıoğlu ve Demir 2017).

Envanter girdi ve çıktıları belirlendikten sonra çevresel etkilerin belirlenmesi için karakterizasyon aşaması önem arz etmektedir. Bunun için karakterizasyon aşamasında bir etki kategorisindeki bir maddenin büyüklüğü, o kategori için bir temel parametreye göre eşdeğerlik faktörüne dayalı olarak hesaplanır (McNamara vd. 2016). Örneğin, son atıksu deşarjındaki kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), ötrofikasyona katkı sağlamaktadır. Ötrofikasyon için temel parametrenin fosfat ($PO4^{-3}$) olduğu bilinmekte olup, ötrofikasyon etki kategorisinde 1 değerine sahiptir. KOİ'nin eşdeğerlik faktörü değeri ise 0.022 olarak ifade edilmiştir (Baumann ve Tillman 2004). Bu nedenle her 1 g KOİ, CML ötrofikasyon etki kategorisinde 0.022 g PO_4^{-3} eşdeğer olduğu ifade edilmiştir (Baumann ve Tillman 2004). Envanter analizinin ve etki kategorilerinin doğru seçimi gerçekleştirilen YDA için önem taşımaktadır.

Karakterizasyon, belirli bir kategorideki tüm maddelerin tek bir puanda veya gösterge sonucunda toplanması olup, bir denklem yardımıyla ifade edilmektedir (Guinée 2002). Bağıntı (1)'de yer alan ifadelerden; i, maddenin türü, m_i büyüklük ve ef_i o madde için eşdeğerlik faktörünü ifade etmektedir.

$$\text{Sonuç Göstergesi} = \sum_i m_i ef_i \quad (1)$$

Normalizasyon ise; farklı etki kategorilerinde elde edilen sonuçların ortak bir birimde karşılaştırmasıdır (Demirer 2011). Gruplandırma, belli başlı ilgi alanlarına ait sonuçları daha iyi değerlendirmek için etki kategorilerinin, çeşitli başlıklar (konuma, bölgeye göre) altında ifade edilmesidir (Demirer 2011). Ağırlıklandırma ise elde edilen sonuçların etki kategorilerinin önemine göre ifade edilmesi işlemidir (Demirer 2011).

Küresel ısınma, ozon tabakası incelmesi, asidifikasyon, ötrofikasyon, insan toksisitesi arıtma çamurlarının sebep olduğu etkilerin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan etki kategorileridir (Guinée 2002). Yaygın olarak kullanılan etki kategorileri hakkında EPA tarafından oluşturulan etki kategorileri ve eşdeğer faktör birimleri Çizelge 2.2'de gösterilmiştir (USEPA 2006).

2.3.4. YDA yorumlama

Modellemenin dördüncü ve son adımı olan yorumlama, çalışmanın amaç ve kapsamı doğrultusunda hem envanter hem de çevresel etki analizi aşamalarının sonuçlarını açık ve şeffaf bir şekilde yorumlayarak, incelenen sistem veya ürünle ilgili önemli çıkarımları ortaya koymak ve tavsiyeler sunmak olduğunu ifade eden, etki verilerinin bir analizidir (Demirer 2011). Analizi gerçekleştirilen ve elde edilen tahminler kullanılarak, perspektif ve metodolojilere göre yorumlama gerçekleştirilir.

Çizelge 2.2. Yaygın olarak kullanılan yaşam döngüsü etki analizi kategorileri (USEPA, 2006)

Etki Kategorisi	Ölçek	Değerlendirilen Veriler	Yaygın Karakterizasyon Faktörü	Karakterizasyon Birimi (eq)
Küresel ısınma	Küresel	Karbondioksit (CO_2), Azot dioksit (NO_2), Metan (CH_4), Hidrokoloroflorokarbonlar, Kloroflorakarbonlar (CFCs), Metil Bromür	Küresel Isınma Potansiyeli	kg CO_2
Stratosferik Ozon İncelmesi	Küresel	Kloroflorokarbonlar (CFCs), Hidrokloroflorokarbonlar, Metil Bromür, Halonlar	Ozon Tabakası İnceltme Potansiyeli	Trikloroflorometan (kg CFC-11, kg R-11)
Asidifikasyon	Bölgesel, Yerel	Azot oksitler, Hidrolik asit, Amonyak (NH_3), Sülfüroksit (SO_2)	Asidifikasyon Potansiyeli	Verileri hidrojen (H^+) iyonu eşdeğerine dönüştürür
Ötrofikasyon	Yerel	Fosfat (PO_4^{3-}), Azot oksit (NO), Azot Dioksit (NO_2), Nitrat(NO_3^-), Amonyak (NH_3)	Ötrofikasyon Potansiyeli	kg PO_4^{3-}
Fotokimyasal Sis	Yerel	Metan içermeyen hidrokarbon	Fotokimyasal Oksit oluşturma Potansiyeli	kg etan (C_2H_6)
Karasal Toksisite	Yerel	Zehirli Kimyasallar	LC_{50}	LC_{50} verilerini eşdeğerine dönüştürür, Lkg diklorobenzen ($C_6H_4Cl_2$)
Tatlı su ürünleri Toksisitesi	Yerel	Zehirli Kimyasallar	LC_{50}	LC_{50} verilerini eşdeğerine dönüştürür, kg $C_6H_4Cl_2$
İnsan toksisitesi	Küresel, Bölgesel, Yerel	Havaya, toprağa ve suya gerçekleştirilen salınımlar	LC_{50}	LC_{50} verilerini eşdeğerine dönüştürür, kg $C_6H_4Cl_2$
Kaynak Tüketimi	Küresel, Bölgesel, Yerel	Kullanılan mineral ve fosil yakıt miktarı	Kaynak Tüketim Potansiyeli	Kullanılan kaynak miktarının, rezervde kalan kaynak miktarına oranına dönüştürülmesi
Arazi Kullanımı	Küresel, Bölgesel, Yerel	Düzenli depolama veya diğer arazi modifikasyonlarında bertaraf edilen miktar	Arazi Mevcudiyeti	Tahmini bir yoğunluk kullanarak KM kütlesinin hacme dönüştürülmesi
Su Kullanımı	Bölgesel, Yerel	Tüketilen ya da kullanılan su	Su Kıtlığı Potansiyeli	Kullanılan su miktarının, rezervde kalan su miktarına oranına dönüştürülmesi

2.3.5. YDA kapsamında kullanılan yazılımlar

Envanter oluşturmak ve çevresel etkileri fonksiyonel birim çerçevesinde belirlemek amacıyla çeşitli açık kaynak ya da ücretli yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımlar farklı arayüzlerde envanteri oluşturmak ve çevresel etki kategorileri için değerlendirme işlemini gerçekleştirerek birbirine benzer sonuçların elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Hospido vd. 2004; Lundin vd. 2004; Houillon ve Jolliet 2005; Rebitzer vd. 2004; Yoshida vd. 2013; Yoshida vd. 2018). Bu doğrultuda dünya çapında yaygın olarak SimaPro, GaBi, OpenLCA, Earth Smart, LCAiT, BioWin ve EASETECH yazılımları kullanılmaktadır.

2.4. Arıtma Çamurları Yönetiminin YDA Kapsamında Değerlendirilmesine Yönelik Çalışmalar

Arıtma çamurlarının kurutulması sürecinde çevresel etkilerin belirlenmemesi kapsamında yaygınlaşan YDA uygulamaları, literatürde arıtma çamurlarının sebep olduğu çevresel etkileri azaltmak için termal kurutma, kompostlama, yakma, kireç ile stabilizasyon ve depolama gibi çeşitli bertaraf yöntemleri ile arıtma çamurunda bulunan besin kaynaklarının geri kazanımı yöntemlerinin uygulanabilirliğini araştırmak amacıyla uygulanmaktadır (Singh ve Agrawal 2008; Yoshida vd. 2013). Bu yöntemlerin karşılaştırılması ile çevresel ve ekonomik açıdan en uygun arıtma teknolojilerinin ve yöntemlerinin belirlenmesi sağlanabilir.

Hospido vd. (2004, 2005, 2008) gerçekleştirdikleri çalışmalarda, arıtma çamuru süreçlerini bir bütün olarak tek bir süreç ve ayrı bir süreç olarak ele almış olup çamur arıtma süreçlerine gelen girdi ve çıktıları değerlendirmiştir. Hospido vd. (2004), tarafından gerçekleştirilen çalışmada YDA perspektifinden AAT faaliyetlerinin çevresel etkilerini ölçmek için AAT envanteri yapılmıştır. Bu doğrultuda atıksu, arıtma çamuru ve biyogaz üretiminin mevcut olduğu AAT sistem sınırı olarak kapıdan mezara yaklaşımı benimsenmiş olup, değerlendirmeler 5 alt kategoride yapılmıştır. Çalışmalarda envanterlerin derlenmesinde fonksiyonel birim atıksu ve çamur için ayrı ayrı ifade edilmiştir. Simapro 5.0 yazılımı kullanılmış olup, etki kategorilerini oluşturmak için CML faktörü seçilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, süreçle ilişkili sıcak noktalar belirlenmiş ve çevresel etkiler her bir ünite için ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Hospido vd. 2004). Oluşturulan envanter sonuçları doğrultusunda, ötrofikasyon ve karasal ekotoksisite potansiyeli ön plana çıkmaktadır. Oluşan çevresel etkilerin nemli ve kuru mevsim olarak toplanarak AAT performansının ayrı ayrı değerlendirdiği fakat oluşan çevresel etkilerin birbirine yakın sonuçları verdiği belirtilmiştir. Atıksu arıtmanın bariz faydalarının yanı sıra, geleneksel Atıksu Arıtma Tesisleri alışılmadık derecede yüksek enerji taleplerine sahiptir. Ötrofikasyon potansiyeli söz konusu olduğunda; amonyum (NH_4), PO_4^{-3} ve organik maddelerin suya emisyonunun, çevresel etkilerin oluşmasındaki ana faktörler olduğu vurgulanmıştır. Karasal ekotoksisite potansiyeli açısından, arıtma çamuru içerisinde yer alan ağır metallerin ana faktör olduğu belirtilmiş olup, ilgili ağır metallerden olan krom, cıva ve çinkonun en büyük çevresel etkiyi gösterdiği belirtilmiştir. Alt kategorilerin değerlendirilmesinde, çamur uygulamasının çevresel açıdan en büyük etkilere sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Arıtma çamurlarının, arazi uygulamalarının gerçekleştirilmesinin yaratacağı etkiler endişe

konusu olarak değerlendirilmiş olup, kompost uygulanması sırasında patojenlerin uzaklaştırılmasıyla arıtma çamurlarının tehlikesiz bir kaynağa dönüştürülebileceği belirtilmiştir.

Hospido vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada biyolojik ve termal süreçleri, yani anaerobik çürütme, piroliz ve yakmayı ele alan YDA değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Arıtma tesislerinde gerçekleştirilen prosesler sonucu açığa çıkan birincil ve ikincil arıtma çamurları için yoğunlaştırıcı ile başlayan sistem sınırları arazi uygulaması, yakma ve piroliz olarak farklı senaryolar değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birim olarak 1 ton kuru çamur seçilmiştir. Simapro 5.1 yazılımından faydalanılırken, etki değerlendirmesi için CML faktörleri kullanılmıştır. Arıtma çamurunun en etkili kullanımı hem enerjinin hem de malzemenin yeniden kullanılması anlamına gelmekte olup, bu durumun her zaman mümkün olmadığı ifade edilmiştir. Çalışmaya göre arıtma çamurlarının tarım arazilerine uygulanmasının; patojenlerin, virüslerin, ağır metallerin ve organik kalıntılarının mahsullere ve hayvanlara potansiyel taşınma ile transferine neden olabilecek potansiyele sahiptir. Çalışma sonuçlarına göre anaerobik olarak çürütülmüş çamurun araziye uygulanmasının, arıtma çamurunun içerisinde yer alan ağır metal içeriğinin azaltılması sağlandığı sürece, çevresel etkiler açısından mevcut senaryolar arasında uygulanabilecek en uygun yöntem olduğu belirtilmiştir (Hospido vd. 2005).

Hospido vd. (2008) tarafından İspanya'da gerçekleştirilen çalışmanın genel amacı, kentsel atıksu için en yaygın seçeneklerin çevresel değerlendirilmesidir. Bu doğrultuda AAT konfigürasyonları ve bu tesislerin çevresel yükleri belirlenerek tipik çalışma koşullarının çevresel performansının tanımlanmasına ve ayrıca olası konfigürasyonlar arasında birkaç mevcut birimin karşılaştırılmasına odaklanılmıştır. Fonksiyonel birim olarak, kişi eşdeğerinden (PE) üretilen atıksu miktarı dikkate alınmıştır. Sistem sınırı olarak kapıdan mezara yaklaşımın hâkim olduğu çalışmada, Simapro v.5.1 yazılım olarak kullanılmış olup, etki analizinin gerçekleştirilmesi için CML (2002) faktöründen yararlanılmıştır (Hospido vd. 2008). Seçilen sistem sınırları atıksuyun toplanması ve ishale hattı ile taşınması sürecini kapsamamaktadır. Çalışmanın ana odak noktası, kapıdan mezara yaklaşımıyla, AAT yönetilmesi sürecinde işletilen prosestir. Tipik bir AAT bünyesinde atıksu arıtımı, arıtma çamuru yönetimi ve biyogaz üretimi süreçleri yer almakta olup, bazı tesisler özelinde farklılık gösterebilse bile, ilgili değerlendirmenin gerçekleştirildiği dört arıtma tesisi için sadece atıksuyun arıtımı değil, aynı zamanda; üretilen farklı katı fraksiyonlar ve arıtma çamuru, elektrik üretimi, kimyasalların üretimi de dahil olmak üzere 5 alt sistemden oluşan genel bir sistem tanımlanmıştır. Çalışmalarda, 4 farklı AAT için veriler elde edilmiştir. YDA kapsamında yer alan ötrofikasyon, ozon tabakası incelmesi, küresel ısınma, asidifikasyon, foto-oksidan oluşumu, abiyotik kaynak tüketimi, toksisite kategorileri için değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. AAT yönetilmesi sürecinde, en büyük olumsuz çevresel etkinin elektrik tüketimine bağlı olarak oluşan CO_2 emisyonundan; çamurun tarımsal toprağa uygulanması sürecinde en büyük olumsuz etkinin ise CH_4 emisyonundan kaynaklandığı belirlenmiştir. Çamur susuzlaştırma sürecinde; bant filtre pres ve santrifüj uygulaması değerlendirilmiştir. Farklı elektrik ve kimyasal tüketimine sahip olan susuzlaştırma sistemlerinde elektrik tüketimine ilişkin veriler, her sistem için sağlanamadığından tam bir değerlendirme yapılabilmesi mümkün olmamıştır. Arıtma çamuru özelinde anaerobik çürütme tercih edilmesinin en başta çamur miktarının

azaltılmasında fayda sağladığı, aynı zamanda karasal toksikoloji potansiyeli ve küresel potansiyeli faktörlerinde, çevresel olarak önemli ölçüde fayda sağladığı belirtilmiştir. Arıtma çamurunun hacim ve miktarının azaltılması sürecinde, anaerobik çürütme aşamasının bulunmadığı sistemlerde, çamur hacmi ve miktarındaki azaltımın sağlanabilmesi için yüksek miktarda kimyasal kullanılması gerektiği tespit edilmiş olup, bu durumun çevresel faktörler üzerindeki olumsuz etkiyi arttırdığı belirlenmiştir. Nüfusu 50.000'den fazla olan merkezler için gerçekleştirilecek AAT tasarımlarında anaerobik çürütücünün sistemlerine dahil edilmesi gerektiği görüşü yer almaktadır. Gerçekleştirilen karşılaştırma, farklı konfigürasyonların, incelenen etki kategorilerinde varyasyonlar gerektirdiğini göstermiştir. İkincil arıtmalı tesisler için daha yüksek elektrik tüketimi bildirilse de AAT'lerin analizi sonucunda önemli bir kriter olan ötrofikasyonda daha iyi sonuçlar alındığı için uygulanması önerilmektedir. Özellikle, NH_4 ve fosfor (P) deşarjı, bu etki kategorisinde ana katkı olarak belirlenmiştir.

Houillon ve Joillet (2005) tarafından gerçekleştirilen YDA çalışmasında ise evsel atıksu çamuru arıtımı için kullanılan altı senaryo değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında; kireçli çamurun tarımsal arazilere uygulanması, sıvılaştırılmış çamur yatağında yakılması, sıvı çamurun ıslak oksidasyonu, kurutulmuş çamurun pirolizi, kurutulmuş çamurun çimento fırınlarında yakılması ve kireçli çamurun depolama alanında kullanılması olmak üzere, altı senaryo çevresel etki kategorilerinden biri olan küresel ısınma potansiyeli perspektifinden değerlendirilmiştir. Sistem sınırları birincil ve biyolojik arıtma çamurlarının karıştığı noktadan başlayıp çamur bertarafına kadar ki süreci içermektedir. Çalışma süresince fonksiyonel birim ise 1 ton kuru madde bertarafı olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda tarımsal uygulama ya da çimento fabrikalarının fırınlarında yakmanın tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir (Houillon ve Joillet 2005).

Singh ve Agrawal (2008) tarafından arıtma çamurunda bulunan besin kaynaklarının gübre olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Arıtma çamurundaki organik karbonun (C) bir kısmının toprakta biyolojik bozunmaya karşı dirençli olması sonucunda toprakta C birikmesi olacağı ve bu durumun iklim değişikliğinin hafifletilmesine ve toprak kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunabileceği sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde Pasqualino vd. (2009) tarafından yürütülen YDA çalışmasında, çeşitli çamur bertaraf seçeneklerinin çevresel etkileri incelenmiş ve arazi doldurmanın en kötü senaryo olduğu sonucuna varılmıştır.

Sablayrolles vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile Fransa'da yer alan arıtma tesisinden elde edilen arıtma çamurlarının kurutma ve kompostlama işlemleri sonrasında toprağa uygulanması sürecinin sebep olduğu çevresel etkiler, insan toksisitesi açısından değerlendirilmiştir. 1 ton susuzlaştırılmış çamur kuru madde miktarının araziye uygulanması fonksiyonel birim olarak tanımlanmıştır. Biyokütle için uygulanan kurutma işleminde biyokütle su ve nem içeriğinin giderilmesi için yenilenemeyen temel enerji gereksiniminin, kompostlama aşamasına göre çok daha yüksek bir tüketime sahip olduğu ve 8 etki kategorisinin 6'sı için kurutma işleminin çevresel etkilerinin fazla olduğu belirtilmiştir (Sablayrolles vd. 2010).

Dong vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Çin'de yaygın olarak kullanılan dört arıtma çamuru arıtma yönteminden (kompostlama, enerji santralinde yakma, termal kurutma ve yakma, çimento fabrikasında yakma) her biri için anaerobik

çürütme kombinasyonunun dâhil edildiği ve edilmediği YDA çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sistem sınırları karışık çamurun elde edilmesi ile başlatılmış ve kapıdan mezara yaklaşımı ele alınmıştır. Fonksiyonel birim olarak 1 ton kuru çamur tanımlanmıştır. Enerji santrali ile yakma işlemi ile termal kurutma sonrası yakma işlemi arasındaki temel farkın kullanılan ilave kömür miktarı olduğu belirtilmiştir. İlgili senaryolarda gerçekleştirilen yakma işlemleri sonrasında ortaya çıkan kül içeriğinin, özel atık arıtma merkezlerine iletileceği ve bertaraf edileceği belirtilmiştir. Etki değerlendirmesi için EDİP 97 faktörü tercih edilmiş olup, küresel ısınma, asidifikasyon, nütrient miktarının arttırılması, hava ve toprak ile bağlantılı insan toksisitesi ve toprak ile ekotoksisite olmak üzere toplamda 6 adet etki kategorisi değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, anaerobik çürütücü uygulamasının çevresel yükü önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Termal kurutma ve yakma işlemi birçok kategoride en az çevresel yüke sebep olan senaryo olarak değerlendirilmiştir. Enerji santrallerinde gerçekleştirilen yakma işleminin ideal bir teknik olmadığı ve çoğu kategoride en yüksek çevresel yüke sebep olan senaryo olduğu ortaya koyulmuştur. Günümüzün revaçta olan konularından biri olan küresel ısınma açısında çalışma sonuçları değerlendirildiğinde en az çevresel etkinin, kompostlama ile elde edilebileceği belirlenmiştir. Kompostlaştırma, küresel ısınma faktörünü azaltmak için olumlu bir etki yaratmasına rağmen, toprağa yüksek ağır metal aktarılmasına sebep olabileceği için termal kurutma ve yakma işleminin uygun senaryolar olduğu sonucuna varılmıştır (Dong vd. 2014).

Gourdet vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada arıtma çamurları hattında anaerobik çürütücü ve mekanik susuzlaştırma ünitesinin kullanıldığı arıtma süreçleri değerlendirilmiştir. Küresel ısınma, asidifikasyon, tatlı su ötrofikasyonu, insan toksisitesi ve iyonlaştırıcı radyasyon etki kategorileri ele alınmıştır. Arıtma çamuru hattının tamamını ve bertaraf sürecini kapsayan bir sistem sınırı belirlenmiştir. Bu sistem sınırı içerisinde, yoğunlaştırma, anaerobik çürütme, çamur susuzlaştırma, taşıma ve tarımsal araziye yayılma öncesi depolanması süreçleri ele alınmıştır. Çamur arıtma hattına giren 1 ton toplam katı çamur fonksiyonel birim olarak belirlenmiş olup, etki kategorilerini oluşturmak için ReCiPe v.1.08/Europe referans değeri ve yazılım olarak GaBi 6.0 kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonuçlarına göre, çamur hatlarındaki çevresel etkilerin gerçek anlamda azaltılması amaçlanıyorsa, anaerobik çürütme sürecinin verimliliğinin arttırılarak geliştirilmesi ve $FeCl_3$ kullanımının azaltılması gerektiği ifade edilmiştir (Gourdet vd. 2017). Bu sayede tesisin çeşitli ünitelerinin işletilmesi sırasında gereksinim duyulan ısıtma ve enerji tüketiminin sebep olduğu çevresel etkilerin azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Stefaniak vd. (2014) tarafından Polonya'da gerçekleştirilen çalışmada, kapıdan kapıya yaklaşımı sistem sınırı olarak belirlenmiş olup arıtma çamuru için 3 farklı kurutma senaryosu oluşturulmuştur. Simapro 7.2 yazılımı ve Ecoinvent v2.2. yardımıyla elde edilen analizler, küresel ısınma potansiyeli açısından değerlendirilmiştir. Fonksiyonel birim olarak %6 KM içeriğine sahip 1 ton arıtma çamuru seçilmiştir. Çalışma içerisinde susuzlaştırma aşaması için susuzlaştırma presi kullanılmış ve üç farklı türde kurutucu olan bantlı kurutucu, konteyner kurutucu ve kesikli kurutucu, KM yüzdesini %98 oranına çıkarmak ve mevcut suyu uzaklaştırmak için uygulanmıştır. Yapılan çalışmada, enerji tüketiminin büyük bir kısmının kurutma aşamasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Kesikli kurutucu ile gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde,

bantlı kurutucular ile gerçekleştirilen kurutma işlemlerine oranla %39,6 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Bantlı ve konteyner kurutucuların enerji tüketimlerinin fazla olmasının, daha fazla çevresel etkinin oluşmasına sebep olduğu sonucuna varılmıştır (Stefaniak vd. 2014).

Lundin vd. (2004) çamur bertaraf seçeneklerini değerlendirirken çevresel etki kategorilerini genişleterek; tarımsal uygulama, atıkla birlikte yakma ve iki yeni teknolojik yaklaşım olan P geri kazanımı ile yakma (Bio-Con) ve P geri kazanımı dahil ayırma (Cambi-KREPRO) olmak üzere dört seçeneğin çevresel ve ekonomik analizini gerçekleştirmiştir (Lundin vd. 2004). Tarımsal uygulama ve atıkla birlikte yakma proseslerinin çevresel ve ekonomik kısıtlamaları olduğu belirlenirken, P geri kazanımını içeren yeni teknolojik yaklaşımları içeren Bio-Con ve Cambi-Krepro uygulamalarının, arıtma çamuru bertarafı konusunda umut verici bir çözüm olabileceği belirtilmiştir. Bio-Con ve Cambi-Krepro proseslerinde hem P hem de enerji geri kazanımı yer almaktadır. Bio-Con prosesinin, Cambi-Krepro ile karşılaştırıldığında, çoğu açıdan daha etkili sonuçları olsa da havaya daha fazla emisyon salınımı gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Çamurun tarımsal uygulama ile tarım alanlarına yayılmasının, çevresel açıdan en az tercih edilen seçenek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca arıtma çamurunun taşınması ve yayılması için enerji ihtiyacı gerektiği vurgulanmıştır. İncelenen kapsam çerçevesinde, arıtma çamurlarının tarımsal uygulanması ve yakma işleminin bazı çevresel etkilerinin yüksek olduğu ve çevresel kısıtlamalara sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Nispeten düşük maliyetli P geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesi, sürdürülebilirliğin çevresel ve ekonomik şartların sağlanmasında etkili olacağı vurgulanmıştır.

Righi vd. (2013) tarafından 4 farklı senaryo kullanılarak arıtma tesisi ve arıtma çamurlarının çevresel etkileri ve enerji dengesi değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Sistem sınırları kapıdan mezara yaklaşımı ile karışık çamurun oluşmasından bertarafına kadar geçen süreci içermiştir. Bu değerlendirme aşamasını gerçekleştirmek için GaBi 4 yazılımı, envanter oluşturmak için Ecoinvent veri tabanı ve etki değerlendirmesi için CML faktörü kullanılmıştır. İlk senaryo karışık çamurun doğrudan düzenli depolamaya taşınmasını, ikinci senaryo susuzlaştırma işlemi ile %25 KM içeriğine ulaştırıldıktan sonra düzenli depolamaya taşınmasını, üçüncü senaryo ise ikinci senaryoya ek olarak anaerobik çürütücülerin dahil edilmesi ile oluşturulmuş olup, dördüncü senaryoda ise anaerobik çürütücü sonrası kompostlama aşaması planlanmıştır. Fonksiyonel birim olarak 3000 ton biyobozunabilir atık seçilmiştir. CML faktörü kullanılırken, üzerinde mutabık kalınan bir etki kategori listesi var olmadığı için, genellikle atık yönetimi ile ilgili olduğunu düşünülen küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon, ötrofikasyon, ozon tabakasının incelmesi ve fotokimyasal ozon oluşumu kategorileri açısından değerlendirme tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda her etki kategorisi için en iyi sonucu anaerobik çürütücü ve kompostlama işleminin uygulandığı senaryo kapsamında elde edildiği vurgulanmıştır. Çıkan sonuçlar değerlendirildiğinde, atıkların taşınmasının çevresel yük açısından ana etki kaynağı olduğu belirlenmiş olup atık hacminin azaltılması gerektiği ifade edilmiştir (Righi vd. 2013).

Piao vd. (2016), YDA ve ekonomik verimlilik analizi (EVA) uygulayarak arıtma çamuru bertaraf yöntemleri dâhil olmak üzere Kore'de çeşitli AAT süreçlerini değerlendirmiştir. AAT atıksu girişinden başlayan sistem sınırları, düzenli depolama sürecini kapsayan geniş bir sistem olarak tanımlanmıştır. Envanter oluşturulması ve çevresel etkilerin analizi edilmesi için GaBi 5.0 yazılımı tercih edilmiştir. Fonksiyonel

birim olarak 1 m^3 atıksu seçilmiş olup çamur arıtma ve çamur bertaraf süreçleri de değerlendirilmiştir. Mevcut tesislere ilave oluşturulan 3 farklı senaryoda anaerobik çürütücü sonrası uygulanan düzenli depolama, yakma ve kompost aşamaları değerlendirilmiştir. Etki analizi için CML2001, EDIP1997 ve ReCiPe orta nokta faktörlerinden yararlanılarak mevcut AAT sistemlerinde küresel ısınma potansiyeli, ötrofikasyon, insan toksisitesi ve asidifikasyon etki kategorileri değerlendirilmiştir (Piao vd. 2016). Kullanılan senaryolar ve etki kategorileri için kullanılan faktörler göz önüne alındığında, YDA ve EVA uygulamasının entegre bir AAT-çamur yönetim sistemini optimize etmek için yararlı bir araç olduğu belirtilmiştir (Piao vd. 2016).

Yoshida vd. (2014), tarafından gerçekleştirilen çalışmada atıksu ve arıtma çamurlarının arıtımı değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmada atıksu birincil ve ikincil arıtma ile arıtılıp, N ve P giderimi gerçekleştirilmiştir. Arıtılan suyun okyanusa deşarjı sağlanırken, oluşan çamura ise anaerobik çürütücü ve yakma işlemleri uygulanmıştır. Anaerobik çürütücüden gelen biyogaz, elektrik ihtiyacını karşılamada ve proses ısıtmada kullanılırken, arıtma çamurunun yakılması sonucu oluşan küller sahada yer alan atık sahasına iletilmektedir. Sistem sınırları atıksuyun tesise ulaştığı nokta ile başlamış ve atıksuyun deşarjı ve yakılan çamur küllerinin bertaraf sahasına taşınması ile sonlandırılmıştır. Sistem sınırları dahilinde fonksiyonel birim ise, AAT'ye giren günlük ortalama atıksu miktarının arıtılması olarak m^3 olarak belirtilmiştir. EASETECH yazılımı ile Ecoinvent V.2.2 veri tabanı kullanılmış olup, dört farklı senaryo kapsamında çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Bunlar; i) zorunlu olarak atıksu arıtımı gerçekleştirilip deşarj edildiği süreç, ii) atıksu arıtımı sonrası anaerobik çürütücünün uygulandığı ve oluşan çamurun ve biyogazın yakıldığı süreç, iii) ikinci senaryoya ilave olarak, anaerobik çürütücü ile arıtma çamuru yakma süreci arasına susuzlaştırmanın dahil edildiği süreç ve iv) üçüncü senaryoya ilave olarak kullanılan elektrik, yakıt ve kimyasal kaynakların dahil edildiği süreci içeren senaryolardır. Atıksu arıtma süreçlerinden kaynaklanan kaçak emisyonların toplam küresel ısınmanın %19.5'ini oluştururken, biyogaz kaçağı ise; karasal ekotoksisite, asidifikasyon ve küresel ısınmanın etki potansiyeline sırasıyla %43.8, %23.4 ve %3.7'sini oluşturduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, elektrik tedariğinden kaynaklanan emisyonlar ve biyogaz kullanımı yoluyla elektrik üretiminden elde edilen emisyon tasarruflarının tüm etki kategorilerinin değişiminde büyük paya sahip olduğu belirtiliştir. Özellikle biyogazın %90'ından fazlasının kombine ısı ve güç üretimine gönderilmesinin, etki kategorileri arasında oluşan çevresel etkilerin %1.6 ila %27.5 oranında azaltılmasını sağladığı bildirilmiştir. Arka plan emisyonlarını dahil etmek için yakıt kullanımı, elektrik ve arıtma kimyasalları gibi operasyonel veriler dahil edilmesinin, çevresel performansın tam bir resmini sağlamak için önemli olduğu vurgulanmıştır. Yakıt, elektrik ve atıksu ile çamurun arıtılmasında kullanılan kimyasalların sağlanması gibi harici süreçlerden kaynaklanan emisyonların, proses boyunca oluşan emisyonlarla eşit veya daha fazla önemli olduğu vurgulanmıştır (Yoshida vd. 2014).

Yoshida vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada çamur arıtımı için 5 farklı senaryo değerlendirilmiştir. Bu senaryolar; birincil ve ikincil arıtma sırasında oluşan arıtma çamurlarının karıştırılması sonrasında; i) susuzlaştırma işleminin uygulanması, ii) susuzlaştırma sonrası kireç stabilizasyonu, iii) anaerobik çürütücü uygulaması, iv) susuzlaştırma sonrası anaerobik çürütücü uygulaması, v) susuzlaştırma ve anaerobik çürütücü uygulanan çamurun yakılması alternatiflerini içermektedir. İlgili

senaryolar kurutma için uygulandıktan sonra tarım arazisine ve düzenli depolama alanına yollanması aşamaları değerlendirilmiştir. Çalışma sırasında YDA için EASETECH 05.02.04 yazılımı ve Ecoinvent v.2.2 veri tabanı kullanılmıştır. Envanterin oluşturulması için fonksiyonel birim arıtılmış ve bertaraf edilecek 1000 kg karışık çamur olarak tanımlanmıştır. Özellikle anaerobik çürütücü uygulanmasının arıtma çamurlarından enerji kazanımı ve çevresel yüklerin azaltılması açısından önemli olduğu vurgulanmıştır. Arazi uygulaması sırasında arıtılan çamurun gübre olarak kullanılması da çevresel yüklerin azaltılması adına bir kazanım olarak değerlendirilmiştir (Yoshida vd. 2018).

Buonocore vd. (2016) tarafından İtalya'da yer alan bir AAT için atıksu arıtımı, arıtma çamurlarının arıtılması ve bertarafı kapsamında oluşturulan 4 senaryonun çevresel etkileri incelenmiştir. İlk senaryo kapsamında atıksu arıtımı sırasında elde edilen çamurun mekanik kurutulması, susuzlaştırma işlemi ve nihai bertarafı için düzenli depolama sahasına taşınımı ele alınmıştır. Bir diğer senaryoda ise anaerobik çürütücü sisteme dahil edilerek elde edilebilecek biyogaz üretiminden faydalanılmıştır. İkinci senaryoya ilave olarak kalıntı kütlenin gazlaştırma aşaması ilave edilerek üçüncü senaryo oluşturulmuştur. Son senaryo kapsamında ise atıksu deşarjı noktasında değişiklikler gerçekleştirilmiş ve nehre deşarj yerine, tesisin bulunduğu bölgede oluşturulacak rekreasyon alanında %50 kullanılması ve deşarj edilen su kütlesinin yarı yarıya azaltılması değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında sistem sınırları atıksuyun tesise girdiği noktadan başlatılmış ve bertarafı ile sonlandırılmıştır. Fonksiyonel birim olarak 1000 m^3 atıksu tanımlanmıştır. Etki değerlendirmesini kolaylaştırmak ve karşılaştırma imkânı sağlamak amacıyla ReCiPe orta nokta değerlendirmesi tercih edilmiştir. Yapılan çalışma soncunda biyogaz üretimi ve sentez gazlarının yakılması sonucu oluşan elektrik ve ısının tesis işletme maliyetini azaltmak için kullanılmasının ve oluşan arıtılmış atıksuyun çeşitli ağaç türlerini beslemek için kullanılmasının entegre bir yönetimle her bir kategori için oluşan çevresel etkilerin azaltılmasına olumlu etkiler sağlayacağı belirtilmiştir (Buonocore vd. 2016).

Blanco vd. (2016) İspanya'da bulunan iki farklı arıtma tesisinin çevresel etkilerini incelediği çalışma kapsamında anaerobik çürütücünün dahil edildiği ve dahil edilmediği senaryoları değerlendirmiştir. Fonksiyonel birim olarak 60 $gBOİ_5$ seçilmiştir. İlgili senaryoları değerlendirmek için Simapro v.7.3. yazılımı kullanılmış olup, oluşturulan envanterler kullanılarak çevresel etkilerin belli bir gösterge puanına dönüştürülmesi, kategorize edilmesi ve değerlendirilmesi için ReCiPe v.1.08 tercih edilmiştir. Çalışma sonuçlarına bakıldığında oluşan çevresel etkilerin kategorize edilmesi sonucu, ana etkilerin küresel ısınma potansiyeli kategorisinden hem ekosistem hem de insan sağlığı üzerine olduğu belirtilmiştir. Bu etki kategorisinin değerlendirilmesine anaerobik çürütücü dahil edilerek ve dahil edilmeyerek oluşturulan senaryolarda, anaerobik çürütücünün dahil edilmediği sistemde aynı etki kategorileri için yaklaşık 3 kat etkinin oluştuğu belirlenmiştir. Bu YDA çalışmasının bize sunduğu bilgiler ışığında anaerobik çürütücünün kullanılması, AAT'ler için önemli bir bileşen olarak yer almakta olup, özellikle çürütülmüş çamurun gübre olarak kullanıldığı durumların çevresel açıdan önemli olduğu sonucuna varılmıştır (Blanco vd. 2016).

Bravo ve Ferrer (2011) İspanya'nın Barcelona bölgesinde yer alan tam ölçekli bir AAT'de oluşan çevresel etkileri değerlendirmek için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sırasında temel olarak kaynak ve enerji tüketimlerine odaklanılmıştır.

Sistem sınırları atıksuyun tesise girişi ile başlayan arıtılmış atıksu ve arıtma çamuru deşarjı ile tam ölçekli bir değerlendirmeyi kapsamaktadır. Arıtma çamurlarının arıtılması kapsamında fonksiyonel birim olarak 100 m^3 yoğunlaştırılmış çamur seçilmiştir. Oluşturulan envanter doğrultusunda etki değerlendirilmesi gerçekleştirmek amacıyla CML 2 referans değerlendirmesi tercih edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, doğalgazın kojenerasyon motorlarında yakılması küresel ısınma ve abiyotik kaynakların tüketilmesi kategorilerinde olumsuz yönde çevresel yük oluştururken, kojenerasyon ünitesinde biyogazın yakılması bu olumsuz etki açısından daha küçük bir paya sahiptir (Bravo ve Ferrer 2011). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Blanco vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki sonuçlara paralel bir yorumu ortaya koymakta ve çamur arıtma aşamasında anaerobik çürütücü kullanılması ve biyogaz üretiminin artırılmasıyla AAT'de oluşan çevresel etkilerin azaltılabileceğini göstermektedir (Blanco vd. 2016; Bravo ve Ferrer 2011).

McNamara vd. (2016) EPA tarafından 2013 yılında başlatılan araştırma projesi kapsamında İrlanda'da bulunan AAT'lerin kaynak ve enerji verimlilikleri kıyaslaması için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada belirtilen verimlilik kıyaslamalarını gerçekleştirmek için Gabi 6.0 yazılımı kullanılmıştır. Etki kategorilerinin belirlenmesi için ise CML 2001'den yararlanılmıştır. Bu kıyaslamanın sağlıklı gerçekleştirilmesi için boyutu ve lokasyonu farklı olan iki AAT seçilmiş olup, enerji tüketimleri ve araziye uygulanan çamurun ortalama çevresel etkileri arıtma süreçleriyle birlikte ilişkilendirerek çalışma gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim olarak birim eşdeğer nüfus (EN) 0.2 m^3 atıksu olarak tanımlanmıştır. Sistem sınırları olarak "kapıdan mezara" yaklaşımı seçilmiş olup, kapı kavramı atıksuyun fiziksel olarak tesise girişinin gerçekleştiği nokta olarak ifade edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda iki farklı bölgede yer alan farklı ölçeklerdeki AAT'ler için ana çevresel etkiyi oluşturan kaynağın deşarj limitleri olduğu belirtilmiştir (McNamara vd. 2016).

Yukarıda özetlenen çalışmalara ait bilgiler Çizelge 2.3'te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.3. Arıtma çamurları yönetimi kapsamında gerçekleştirilen YDA çalışmaları sonuçları

Ülke	Etki Faktörleri	Fonksiyonel Birim	Uygulama	Sonuç	Kaynaklar
İspanya	CML	Arıtılan atıksu ve çamur	AAT'nin farklı ünitelerinin ve arıtma çamur bertarafının değerlendirilmesi	Etki açısından mevsimsel bir farklılık gözlenmemiştir. Çamurun araziye uygulaması en olumsuz etkiye sebep olmuştur. Havalandırma için tüketilen elektrik enerjisi, ötrofikasyon açısından olumlu etki sağlasa da küresel ısınma potansiyelini ve asidifikasyonu olumsuz etkilemiştir. Ancak ötrofikasyondaki azalma, diğer kategorilerde gerçekleşen artışa kıyasla daha önemlidir. Çamurdan kaynaklı ağır metaller, karasal ekotoksisite için etkili tek parametre olmuştur.	Hospido vd. 2004
İspanya	CML	1 tKM karışık çamur	Arıtma çamurları için; yoğunlaştırma, susuzlaştırma ile yakma ve piroliz süreçlerini içeren senaryolar	Anaerobik çürütme uygulanmış çamurun araziye uygulanması, arıtma çamurunda bulunan ağır metallerin azaltılması sağlandığı sürece, çevresel etkiler açısından en uygun senaryo olmuştur.	Hospido vd. 2005
-	-	1 tKM atılan çamur	Çamur arıtma için oluşturulan altı senaryo	En iyi çevresel etkiye sahip çamur susuzlaştırma ve bertaraf yöntemlerinin; tarımsal uygulama ya da çimento fabrikalarının fırınlarında yakılması olarak yönetilmesi gerektiği belirtilmiştir.	Houillon ve Joillet 2005
İspanya	CML 2002	Bir kişi eşdeğeri atıksuyun arıtımı	Farklı kapasitelerde dört tesisin atıksu ve arıtma çamurun arıtılması açısından değerlendirilmesi	İleri arıtma elektrik tüketimi yüksek olsa da ötrofikasyon etkilerini azalttığı için önerilmiştir. Anaerobik çürütme karasal toksikoloji potansiyeli ve küresel potansiyelinde önemli fayda sağlamıştır. Anaerobik çürütme bulunmadığında yüksek miktarda kimyasal kullanılması olumsuz etkiyi arttırmıştır. Nüfusu 50.000'den fazla olan AAT'lerde anaerobik çürütücünün ve bant filtrenin sistemlerine dahil edilmesi önerilmiştir.	Hospido vd. 2008
Fransa	-	1 ton susuzlaştırılmış çamur	Susuzlaştırılmış çamurun, kurutma, kompost ve araziye uygulanması senaryoları	Kurutma işleminde, biyokütle su ve nem içeriğinin giderilmesi için yenilenemeyen temel enerji gereksinimi, kompostlama aşamasına göre çok daha yüksek bir tüketime ve etkiye sahip olmuştur.	Sablayrolles vd. 2010
İspanya	CML 2 Referans değeri	100 m^3 yoğun çamur	AAT için anaerobik çürütme teknolojisinin dahil olduğu ve olmadığı senaryolar	Doğalgazın, kojenerasyon motorlarında yakılması, küresel ısınma ve abiyotik kaynakların tüketilmesini olumsuz etkilemiştir. Anaerobik çürütücünün dahil edilmediği sistemde, anaerobik çürütücü içeren sisteme göre aynı etki kategorileri için yaklaşık 3 kat etkinin oluştuğu belirtilmiştir.	Bravo ve Ferrer 2011
İtalya	CML	3000 ton biyobozunabilir atık	Çamur çürütme, susuzlaştırma ve kurutma aşamalarını içeren senaryolar	Her etki kategorisi için en iyi sonuç anaerobik çürütücü ve kompostlama işleminin uygulandığı senaryo ile elde edilmiştir. Oluşan arıtılmış çamurun taşınmasının çevresel yük açısından ana etki kaynağı olduğu belirlenmiştir.	Righi vd. 2013
Polonya	-	%6 KM içeriğine sahip 1 ton çamur	Çamur susuzlaştırma ve kurutma senaryoları	Enerji tüketiminin büyük bir kısmının kurutmadan kaynaklanmıştır. Bantlı ve konteyner kurutucuların enerji tüketimleri fazla olduğu için çevresel etkileri fazla olmuştur. En iyi performansı bantlı kurutucuya göre %39.6 daha az enerji tüketimi olan yığın kurutucu ile elde edilmiştir	Stefaniak vd. 2014

(Devamı arka sayfada)

Çizelge 2.3'ün devamı

Ülke	Etki Faktörleri	Fonksiyonel Birim	Uygulama	Sonuç	Kaynaklar
Çin	EDİP1997	1 ton KM	Anaerobik çürütücünün dahil edildiği ve dahil edilmediği senaryolar	Anaerobik çürütücü çevresel yükü önemli ölçüde azaltmıştır. Termal kurutma ve yakma birçok kategoride en az çevresel yüke sebep olmuştur. Enerji santrallerinde yakma ise çoğu kategoride en yüksek çevresel yüke sebep olmuştur. En az çevresel etki kompostlama ile elde edilmiştir. Fakat, kompostlaştırma, toprağa yüksek ağır metal aktarılmasına sebep olabileceği için termal kurutma ve yakma en uygun senaryo olarak önerilmiştir.	Dong vd. 2014
İspanya	ReCiPe v.1.08	60 $gBOİ_5$/gün.PE	Anaerobik çürütücünün dahil edildiği ve dahil edilmediği senaryolar	Küresel ısınma potansiyelinin %80'i ve abiyotik kaynakların tükenmesinin %45'i için ana emisyon kaynağı, kojenerasyon ünitesinde elektrik üretimi için doğalgaz yakılmasından kaynaklanmıştır. Anaerobik çürütücünün dahil edilmediği sistemde, aynı etki kategorileri için yaklaşık 3 kat etki gözlenmiştir.	Blanco vd. 2016
İrlanda	CML 2001	0.2 m^3 atıksu /PE	İki farklı boyutta ve lokasyonda yer alan AAT için senaryolar	Ana çevresel etki deşarj limitlerindeki farklılıklar olmuştur. Deşarj limitlerinin düşük olduğu bölgede, ötrofikasyon potansiyeli azalırken, tüketilen enerji ve kimyasallar nedeniyle asidifikasyon ve küresel ısınma potansiyeli çevresel yükü arttırmıştır. P giderimi için demir klorür tüketiminin artması ozon tabakasının incelmesi, küresel ısınma ve deniz canlıları ekotoksisite potansiyellerini arttırmıştır.	McNamara vd. 2016
Kore	CML 2001, EDIP1997, ReCiPe (orta nokta)	1 m^3 atıksu	Entegre çamur yönetimi ve çamur bertarafının gerçekleştirildiği tesislere ait senaryolar	Anaerobik-anoksik-aerobik prosesi, en düşük ötrofikasyon ve küresel ısınma potansiyellerine sahip olmakla birlikte, en yüksek asidifikasyon ve insan toksisitesi potansiyeline sahip olmuştur. Çamurun nihai bertarafı için entegre çamur yönetimi ile yakma, bütün etki kategorilerinde, en yüksek azalmayı sağlamıştır.	Piao vd. 2016
Fransa	ReCiPe Europe referans değeri	1 ton karışık çamur	Çamur arıtımı için senaryolar	Tarımsal araziye yayma ve susuzlaştırma iklim değişikliği, karasal asidifikasyon, tatlı su ötrofikasyonu, insan toksisitesi ve iyonlaştırıcı radyasyon kategorilerinde en yüksek çevresel yükü oluşturmuştur Çamur hatlarındaki etkilerin azaltılması için anaerobik çürütme veriminin arttırılması ve $FeCl_3$ kullanımının azaltılması gerektiği belirlenmiştir..	Gourdet vd. 2017
İtalya	ReCiPe (orta nokta)	1000 m^3 atıksu	4 farklı atıksu ve çamur arıtma senaryosu	Tüm senaryolarda en çok etkilenen kategoriler tatlı su ötrofikasyon ve insan toksisite potansiyelleri olmuştur. Anaerobik çürütücü ve gazlaştırma aşamasının dahil edildiği senaryolarda, küresel ısınma ve fosil tükenme potansiyelleri azalırken, tatlı su ötrofikasyon potansiyeli değişmemiştir.	Buonocore vd. 2016

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Amaç ve Kapsam

Farklı arıtma çamuru kurutma yöntemlerinin yaşam döngüsü analizlerinin yapılması ve bu yöntemlerin çevresel etkilerinin karşılaştırılması amacıyla yürütülen bu çalışmada, sistem sınırı doğrudan çamur kurutma olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında, baz alınan atıksu arıtma tesisinde, arıtma çamurlarının yoğunlaştırma ve anaerobik çamur çürütme sonrasında yaklaşık %20 katı madde (KM) içeriğine ulaştığı belirlenmiştir. Mevcut durumda tesiste termal kurutma uygulamasının ardından %90 KM içeriğine ulaşan arıtma çamurları nihai bertaraf için bölgede bulunan çimento fabrikalarına yakıt olarak gönderilmektedir. Bu doğrultuda, gerçekleştirilen YDA çalışmalarında oluşturulan temel senaryoda; sisteme giren susuzlaştırma ve anaerobik çürütme uygulanmış çamurun KM içeriğinin %20 ve sistemden çıkan kurutulmuş çamurun KM içeriğinin %90 olacağı kabul edilmiştir.

Belirlenen sistem sınırlarını esas alarak kapıdan kapıya yaklaşımıyla; arıtma çamurlarına bantlı kurutma, akışkan yataklı kurutma, döner kurutma ve solar kurutma yöntemleri uygulanması sonucu oluşacak sera gazı emisyonları ve çevresel etkiler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Ardından, gerçek ölçekli uygulama koşulları için belirlenen sera gazı emisyonları ve çevresel etkilerin azaltılması amacıyla uygulanabilecek 8 farklı senaryo oluşturulmuş ve bu senaryoların uygulanması ile çevresel etkilerin ne ölçüde azaltılabileceği belirlenmiştir. Mevcut koşullarda kurutma uygulamaları ana senaryo (Senaryo 0) kabul edilerek, belirlenen senaryolarda çevresel etkilerinin belirlenmesinde ele alınan kabuller aşağıda özetlenmektedir:

- Senaryo 0: %20 KM içeriğine sahip çamurun %90 KM içeriğine çıkartılması sürecinde; bantlı kurutma, akışkan yataklı kurutma, döner kurutma ve solar kurutma yöntemlerinin uygulanması
- Senaryo 1: Ana senaryodan farklı olarak, kurutma sürecinde oluşan gazların filtrede toplanması ve atmosfere salınmasının önlenmesi durumu
- Senaryo 2: Ana senaryoda kullanılan kurutma yöntemlerindeki elektrik ihtiyacının %50'sinin güneş (fotovoltaik) enerjisinden karşılanması durumu
- Senaryo 3: Ana senaryoda kullanılan kurutma yöntemlerindeki elektrik ihtiyacının %50'sinin rüzgâr enerjisinden karşılanması durumu
- Senaryo 4: Ana senaryodan farklı olarak, %20 KM içeriğine sahip çamurun katı madde içeriğinin %80'e çıkacak kadar kurutma uygulanması durumu
- Senaryo 5: Ana senaryodan farklı olarak, %20 KM içeriğine sahip çamurun katı madde içeriğinin %60'a çıkacak kadar kurutma uygulanması durumu
- Senaryo 6: Ana senaryoda kullanılan kurutma yöntemlerindeki ısı ihtiyacının %50'sinin evsel atıkların yakılmasından karşılanması durumu
- Senaryo 7: Senaryo 6'dan farklı olarak, elektrik enerjisinin tamamının fotovoltaik enerjisinden karşılanması durumu
- Senaryo 8: Senaryo 7'den farklı olarak, kurutmanın çamur katı madde içeriği %60'a çıkacak kadar uygulanması durumu

Bu kapsamda, hesaplamalar OpenLCA 1.10 (GreenDelta 2019) yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiş olup, arka plandaki sistemin süreçlerini modellemek için European Platform on LCA (ELCD) veri tabanı kullanılmıştır. Senaryoların kategorize edilmiş çevresel etkilerini değerlendirmek için ReCiPe 2016 Son nokta (H) hiyerarşi yöntemi uygulanmıştır.

3.2. Fonksiyonel Birim

Çizelge 2.3'te, geçmişten günümüze kadar gerçekleştirilen çamur yönetimine yönelik YDA çalışmalarında tercih edilen çeşitli fonksiyonel birimler verilmektedir. Blanco vd. (2016) günlük kişi başına g $BOİ_5$ değerini, McNamara vd. (2016) 0.2 m^3 atıksu değerini, Lorenzo vd. (2016),1 m^3 arıtılmış suyu, Bravo ve Ferrer (2011) 100 m^3 yoğunlaştırılmış çamurun arıtılmasını fonksiyonel birim olarak tanımlamıştır. Diğer çalışmalarda ise, fonksiyonel birim olarak 1 ton kuru çamur seçilmiştir (Suh ve Rousseaux 2002, Hospido vd. 2005; Houillon ve Jolliet 2005; Yang vd. 2020).

Tez çalışması kapsamında incelenmesi planlanan doğrudan çamur kurutma yöntemlerinde, kısa sürede yüksek miktarda arıtma çamuru kurutulurken; solar kurutma yönteminde aynı miktarda çamurun kurutulması için uzun süreler gerekmektedir. Yapılan literatür araştırması sonucunda, farklı kurutma süreçlerinin aynı sürede aynı miktarda çamuru kurutması için YDA yapılmasının daha gerçekçi bir karşılaştırma sunacağı görüşüne varılmıştır. Ticari olarak temin edilebilen doğrudan kurutma sistemleri farklı çamur besleme kapasitelerine sahip konfigürasyonlar içermektedir. Yapılan araştırma sonucunda, bantlı kurutucu, akışkan yataklı kurutucu ve döner kurutucuların hepsinin 150 ton/gün çamur besleme kapasitesine sahip konfigürasyonu olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında fonksiyonel birim 150 ton/gün çamur besleme olarak seçilmiştir.

3.3. Envanter Analizi

Literatürde araştırmaları sonucunda, senaryolar için envanter oluşturulurken enerji tüketimleri ve alan kullanımlarının öncelikli olarak ele alınması gerektiği belirlenmiştir. AAT'nin uzun süreli işletilmesinde yaşam döngüsünün inşaat aşamasının, işletme ve bakım aşamasına kıyasla ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir (Suh ve Rousseaux 2002; Lassaux vd. 2007; Tillman vd. 1998; Lundin vd. 2004; Hospido vd. 2005). Hatta tesis inşaat aşamasını içeren bir çalışmada, kanalizasyon ağı ve tesis inşaatının işletme ve bakımın da dahil olduğu etkinin toplam çevresel etkiye %10'dan daha az katkıda bulunduğu belirlenmiştir (Del Borghi vd. 2008). Bir diğer çalışmada ise küçük sarf malzemeleri ve tesislerin inşası ile ilgili çevresel etkilerin, uzun işletme süreleri (30 yıldan fazla) dikkate alındığında, daha az olduğu belirlenmiş ve dikkate alınmamıştır (Suh ve Rousseaux 2002). Bu doğrultuda, inşaat aşamasının etkisi önerildiği gibi gerçekleştirilen analiz çerçevesinde dikkate alınmamıştır.

Tez çalışması kapsamında, farklı çamur kurutma senaryolarının uygulanması ile çamurun aynı miktarda kurutulacağı ve aynı miktarda suyun buharlaşacağı kabul edilmiştir. Bu sebeple, senaryolara özgü envanter analizi öncesinde kuru çamur ve buharlaşan su miktarları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda su ve çamur yoğunlukları gerekmekte olup suyun yoğunluğu 1000 kg/m^3 olarak kabul edilmiştir. Kurutulmuş çamurun yoğunluğu ise, incelenen gerçek tesisten alınan bilgiler kullanılarak

hesaplanmıştır. Bu amaçla ilk olarak çamur özgül ağırlığı Eşitlik (3.1) de verilen formül ile hesaplanmıştır (Crites ve Tchobanoglous vd. 1998):

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{1}{\frac{\text{SKM}/\text{TKM}}{2,5} + \frac{\text{UKM}/\text{TKM}}{1}} \quad (3.1)$$

Bu formülde; SKM sabit katı madde konsantrasyonunu (mg/g), TKM toplam katı madde konsantrasyonunu (mg/g) ve UKM uçucu katı madde konsantrasyonunu (mg/g) ifade etmektedir. Ardından, hesaplanan özgül ağırlık kullanarak Eşitlik (3.1) de verilen formül ile çamur yoğunluğu hesaplanmıştır (Andreoli vd. 2007).

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{1}{\frac{\%KM}{\rho Çamur} + \frac{\%Su}{\rho su}} \quad (3.2)$$

Bu formülde; %KM çamurun katı madde oranını (%), $\rho_{çamur}$ çamurun yoğunluğunu (kg/m^3), %Su çamurun su oranını (%) ve ρ_{su} suyun yoğunluğunu (kg/m^3) ifade etmektedir. Eşitlik (3.2) ile çamur yoğunluğu belirlendikten sonra 150 ton/gün arıtma çamurunun son hacmi Eşitlik (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır (Tchobanoglous ve Burton 1991):

$$V_{\text{Çamur}} = \frac{W_{\text{çamur}}}{\rho_{\text{çamur}} \times \%\text{KM}} \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte $V_{çamur}$ kurutulmuş çamurun hacmini (m^3/gün) ve $W_{çamur}$ çamurda bulunan katı madde miktarını (kg/gün) ifade etmektedir. Eşitlik (3.3) ile %90 KM içeren kurutulmuş çamurun hacmi belirlendikten sonra ilk çamur hacminden kurutma eşitlik (3.2) ile hesaplanan çamur yoğunluğu ve Eşitlik (3.3) ile hesaplanan kurutulmuş çamur hacmi kullanılarak, 150 ton/gün susuzlaştırılmış çamur içinde 33.25 ton/gün katı madde bulunduğu hesaplanmıştır.

Arıtma çamurlarının kurutulması sonrası kalacak çamur hacmi ve buharlaşacak su hacminin hesaplanmasına paralel olarak, seçilen arıtma çamuru kurutma yöntemleri için ülkemizde uygulanan çamur kurutma uygulamalarına ilişkin bilgiler toplanmıştır. Bu kapsamda, 150 ton çamurun kurutulması için gerekli alan ile kurutma işlemi sırasında harcanan yakıt tür ve miktarlarına ilişkin bilgiler toplanmış ve her bir kurutma yöntemi için YDA çalışmalarında kullanılacak envanter verileri oluşturulmuştur. Solar kurutma yönteminde sadece elektrik enerjisi tüketimi söz konusu iken, bantlı kurutucu ve akışkan yataklı kurutucu ve döner kurutucu teknolojilerinde elektrik enerjisi tüketimine ek olarak doğalgazdan elde edilen termal enerji gerçekleşmektedir. Elektrik ve doğalgaz veri setleri üretimleri, iletilmeleri ve tüketimleri sırasında çevresel etkilere sebep olmaktadır Bu enerji üretim, iletim ve tüketim arka plan girdilerine ait veri setleri olarak ELCD veri tabanında Avrupa Birliği üyesi 27 ülke (AB 27) için belirlenen ortalama değerleri içeren veri setleri kullanılmıştır. Senaryolar için arka plan süreçleri, güneş enerjisinden (fotovoltaik) elektrik içeren süreçler hariç, Avrupa Yaşam Döngüsü Veri tabanı (ELCD) kullanılarak modellenmiştir. Fotovoltaiklerden elektrik üretimine ilişkin arka plan verileri, NEEDS (Sürdürülebilirlik için Yeni Enerji Dışsallıkları Gelişmeleri) projesi çerçevesinde Orta AB için 2025 ve 2050 yıllarına yönelik projeksiyonlarla birlikte fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsü emisyonlarına ilişkin

ayrıntılı bir çalışmadan elde edilmiştir. (Frankl vd. 2005). YDA çalışmalarında kullanılan arka plan veri setleri Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. ELCD ve diğer veri tabanlarından kullanılan veri setlerinin ayrıntıları

Veri seti	Birim	Veri seti açıklaması	Database
Elektrik	kWh	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV, EU-27	ELCD veri tabanı 3.0
Rüzgar enerjisinden elektrik	kWh	Electricity from wind power, production mix, at power plant, AC, < 1kV, RER	ELCD veri tabanı 2.0
Fotovoltaikten elektrik	kWh	electricity, pv, ground mounted power plant, c-Si, low eff., Central EU | Scenario: 2050, realistic-optimistic, 440ppm	Frankl vd. 2005
Doğalgazdan buhar	kWh	Process steam from natural gas 90%, consumption mix, at power plant, heat plant, MJ, 90 % efficiency, EU-27	ELCD veri tabanı 3.0
Atıkların yakılmasından elde edilen buharı	kWh	Waste incineration of biodegradable waste fraction in municipal solid waste (MSW), at plant, average European waste-to-energy plant, without collection, transport and pre-treatment, EU-27	ELCD veri tabanı 2.0
Taşıma	t×km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload, RER	ELCD veri tabanı 2.0

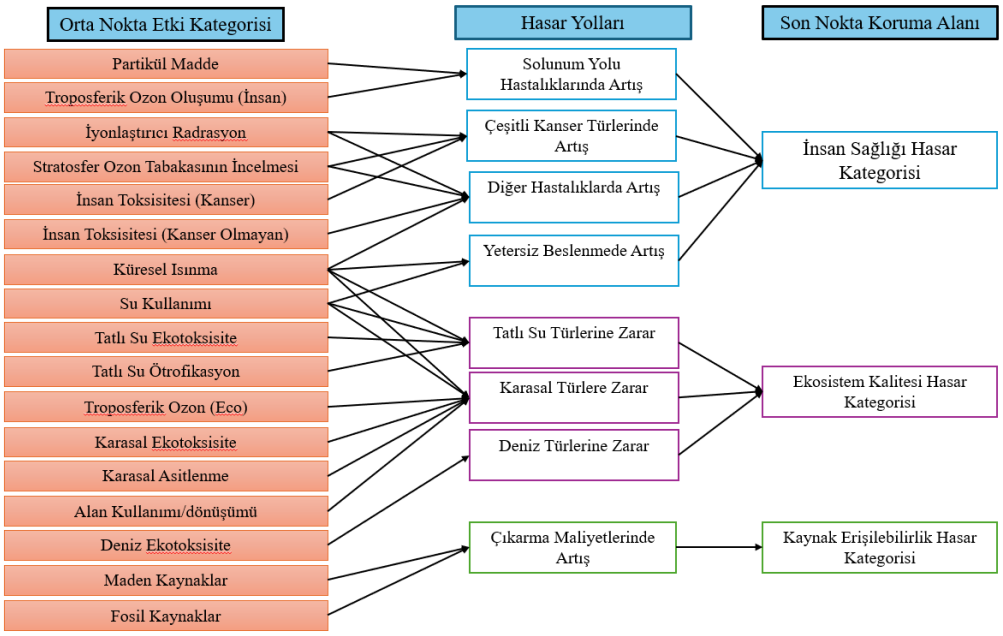
Çamur kurutma işlemlerinde enerji tüketimine ek olarak çamurun kurutulması sırasında atmosfere yayılacak su buharı nedeniyle uçucu organik bileşikler (VOC), metan (CH_4) ve azot dioksit (N_2O) gazlarının atmosfere salınımı söz konusudur (Deng vd. 2009; Ding vd. 2015; Deviatkin vd. 2017; Silva vd. 2023). Çamurun kurutulması sırasında açığa çıkan gazların miktarı literatürden elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda çamurun 100 °C sıcaklıkta kurutulması sırasında 572 mg/kgKM VOC (Gomez-Rico vd. 2008) ve 7.22 mg/kgKM CH_4 (Peregrina vd. 2006) açığa çıktığı belirlenmiştir. Çamurun 100 °C'de kurutulması sırasında açığa çıkan amonyak miktarının ise, toplam azotun yaklaşık %12'si olduğu rapor edilmiştir (Horttanainen vd. 2017). Bu bilgiye ve mevcut tesiste bulunan bantlı kurutucuya beslenen çamurun toplam azot konsantrasyonu olan 57.9 g/kgKM değerine göre çamur kurutma sırasında açığa çıkan amonyak konsantrasyonu 6.95 mg/kgKM olarak hesaplanmıştır. Termal kurutma sırasında uygulana 100-130 °C sıcaklıklarda tüm mikroorganizmalar ölürken, Güneşle kurutma sırasında ulaşılan ortalama sıcaklık aralığı 40-60 °C civarında olup, bu sıcaklıklar pH artışına bağlı olarak bazı termofilik mikroorganizmaların büyümesi için uygun olmaktadır. Bu doğrultuda, güneşle kurutma sistemlerinde mikrobiyal aktivite sonucu atmosfere termal kurutma sistemlerine göre daha fazla amonyak salınmaktadır. O'Shaughnessy vd. (2008), farklı iklim koşulları ve mevsimlerde güneşle kurutma sırasında en yüksek amonyak konsantrasyonunun toplam azotun %23'ü civarında olduğunu belirlemiştir. Bu bilgilere göre, 57.9 g/kgKM amonyak konsantrasyonuna sahip arıtma çamurlarından güneşle kurutma sırasında atmosfere salınacak amonyak konsantrasyonu 13.32 mg/kgKM olarak hesaplanmıştır.

Bu gazlara ek olarak, ulusal yönetmeliklere uygun olarak belirli aralıklarla yapılan baca gazı ölçümleri ile çamur kurutma işlemi sırasında karbon monoksit (CO) emisyonları açığa çıktığı belirlenmiştir. Çamurun kurutulması sırasında açığa çıkan CO konsantrasyonu yaklaşık 24.06 mg/kgKM olarak ölçülmüş olup, bu konsantrasyon yürütülen YDA çalışmalarında kullanılmıştır. Önceki çalışmalara benzer şekilde, biyokütle işleminden kaynaklanan karbondioksit (CO_2) emisyonları Hükümetlerarası

İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2019) tarafından biyojenik olarak sınıflandırıldığından, YDA çalışmalarında kurutma sırasında açığa çıkan CO_2 dikkate alınmamıştır.

3.4. Yaşam Döngüsü Etki Analizi

. ReCiPe metodolojisi CML-IA'da hedeflenen orta nokta (sorun odaklı) ve Eco-indicator 99'da hedeflenen son nokta (hasar odaklı) etki analiz yöntemlerinin bir birleşimi olarak geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında ReCiPe 2016 metodolojisinin hasar ve etki kategorileri Şekil 3.1'de gösterilmiştir



Şekil 3.1. ReCiPe 2016 metodolojisi hasar ve etki kategorileri

ReCiPe metodolojisi, farklı süreç akışlarının her etki kategorisine katkısını ölçmek için karakterizasyon faktörleri sağlamaktadır (Goedkoop vd. 2009). ReCiPe 2016 yöntemi hem orta nokta hem de uç nokta karakterizasyon faktörlerinin hesaplanması için neden-sonuç yollarının uyumlu bir şekilde uygulanmasını sağlayan (Huijbregts vd. 2017), en yaygın kullanılan (Dekker vd. 2020) ve çok çeşitli çevresel etki kategorilerini kapsayan göstergelere sahip yöntemlerden biridir (Alyaseri vd. 2017; Liew 2023). ReCiPe yönteminin bir diğer avantajı, çevresel etkilerin üç son nokta kategorisinde birleştirilerek değerlendirilmesiyle, sonuçların anlaşılması ve karşılaştırılmasına olanak sağlamasıdır. Bu sayede normalleştirme ve ardından uygulanan ağırlıklandırma adımlarının uygulanması ile karşılaşılacak belirsizlikler ortadan kaldırılmaktadır (Bare vd. 2000).

ReCiPe metodolojisinde çeşitli çevresel etki yükleri ve her aşamanın çevresel etkiye katkısını belirlemek için kullanılan 18 orta nokta kategorisi yere almakta olup, bu kategoriler; küresel ısınma, stratosferik ozon tabakasının incelmesi, iyonlaştırıcı radyasyon, ozon oluşumu/insan sağlığı, ince partikül madde oluşumu, ozon oluşumu, karasal ekosistemler, karasal asitlenme, tatlı su ötrofikasyonu, denizde ötrofikasyon,

karasal ekotoksisite, tatlı su ekotoksisitesi, deniz ekotoksisitesi, insan kanserojen toksisitesi, insan kanserojen olmayan toksisitesi, arazi kullanımı, mineral kaynak kıtlığı, fosil kaynak kıtlığı ve su tüketimi kategorileridir.

Çevresel akışlarla daha güçlü ilişkiye sahip olan orta nokta karakterizasyonu ile daha düşük parametre belirsizliği meydana gelmektedir. Fakat çevresel akışlarla ilgili ortaya çıkan sonuçları daha kolay yorumlayabilmek için son nokta karakterizasyonu daha kolay değerlendirme imkanı sağlamaktadır. ReCiPe, hem orta nokta hem de son nokta özelliklerini belirleme faktörlerinin hesaplanması için neden-sonuç yollarının uyumlu bir şekilde uygulanmasını sağlar (Goedkoop vd. 2013). ReCiPe metodolojisinde son nokta (hasar) kategorileri olan insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak kıtlığı, orta nokta etki kategorilerinin hasar faktörleriyle çarpılmasıyla hesaplanır (Goedkoop vd. 2013). İnsan sağlığı üzerindeki etki (Disability adjusted life years; DALY), hastalığa/ölüme neden olan sağlık etkilerini ve kaybedilen yaşam yıllarını tanımlamaktadır. Ekosistem kalitesi, türlerin karasal, tatlı su ve deniz suyu ekosistemlerinde ayrı ayrı alan ve zamana göre kayıplarını göstermektedir (tür*yıl veya tür*m^3*yıl). Kaynak kıtlığı ise, gelecekteki maden ve fosil kaynakların tüketilmesinde ekstra maliyetleri temsil etmektedir. (Goedkoop vd. 2013).

Uç nokta yaklaşımı, kapsamlı bir çevresel değerlendirme yürütmek için daha fazla veri bütünlüğü, ağırlıklandırma, modelleme ve değer seçimi gerektridiği için orta nokta yöntemine göre daha az güvenilirliğe sahiptir (Goedkoop vd. 2009). Ancak, karar vericiler ve paydaşlar için çeşitli planlarda nihai etkinin daha iyi anlaşılması ve değerlendirilmesi göz önüne alındığında, son nokta yöntemi daha fazla tercih edilmektedir (Ding, 2021). Düzenleyicilerin, düzenlemelerin nihai etkilerini belirlemek ve bunu daha geniş topluma açıklamak için uç nokta yöntemlerini kullanması daha avantajlıdır (Bare vd. 2000).

ReCiPe 'de ayrıca benzer türdeki varsayımları ve seçimleri gruplandırmak için bireyci (I), hiyerarşist (H) ve eşitlikçi (E) olmak üzere Üç ayrı yaklaşım uygulanmaktadır (Goedkoop vd. 2009):

- I Perspektifi, kısa vadeli ilgiye, tartışmasız etki türlerine, insanın adaptasyonu konusunda teknolojik iyimserliğe dayanmaktadır.
- H Perspektifi, zaman çerçevesi ve diğer konularla ilgili en yaygın politika ilkelerine dayanmaktadır.
- E Perspektifi, en uzun zaman dilimini, henüz tam olarak belirlenmemiş ancak bazı göstergelerin mevcut olduğu etki türlerini dikkate alan en ihtiyatlı perspektiftir.

Bu tez çalışmasında, temel durumlar için her kurutma teknolojisinin küresel ısınma potansiyelleri, ReCiPe 2016, EF 3.0, ILCD ve IPCC 2021 AR 6 metodolojileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Nihai olarak senaryoları değerlendirmek ve karşılaştırmak için; hem orta nokta hem de son nokta etkilerini kapsayan ReCiPe yöntemi seçilmiştir. Hiyerarşist görüş, 100 yıllık kabul edilebilir bir zaman dilimine sahip, yaygın olarak kabul edilen bilimsel perspektif olduğu için seçilmiştir (PRé 2020).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çamur Kurutma ve Enerji Tüketim Miktarı Hesaplamaları

Çalışma kapsamında esas alınan çamur kurutma ünitesinde kurutulmuş çamurun katı madde içeriği %92.71 ve uçucu katı madde içeriği %70.41 olarak ölçülmüştür. Bu verilere göre Eşitlik (3.1) ve (3.2) kullanılarak çamurun yoğunluğu 1.24 ton/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bu yoğunluğa göre 150 ton arıtma çamuru 121 m^3 arıtma çamuruna eşdeğerdir. Kurutma sonrası çamur hacmi ise Eşitlik (3.3) kullanılarak 26.88 m^3 olarak hesaplanmıştır. Böylece, 150 ton çamurun kurutulması sonucu açığa çıkacak su hacmi 94.09 m^3 olarak hesaplanmıştır.

4.1.1. Solar kurutma enerji tüketim miktarı

Ana Senaryo (Senaryo 0) kapsamında, arıtma çamurlarının solar kurutma uygulanması için mevcut kurulu çamur kurutma tesislerine ilişkin bilgiler toplanmıştır (Redco 2023). Solar kurutma sistemlerinde çamurların kurutulduğu her bir ünite için hol kavramı kullanılmaktadır. Kastamonu Belediyesi tarafından evsel atıksuların arıtılması sonucu açığa çıkan arıtma çamurlarının 30 ton/gün kapasite ile kurutulması için uygulanan solar kurutma sürecinde hol uzunluğunun 12 m ve genişliğinin 150 m olduğu belirlenmiştir. Kilis Belediyesi tarafından evsel atıksuların arıtılması sonucu açığa çıkan arıtma çamurlarının kurutulması amacıyla işletilen solar kurutma sisteminin her biri 10 metre uzunluğunda 3 hol olarak tasarlandığı ve kapasitesinin 24 ton/gün olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Şanlıurfa Büyükşehir Belediyesi tarafından evsel atıksuların arıtılması sonucu açığa çıkan çamurun %25 katı madde içeriğine kadar susuzlaştırılmasının ardından %90 katı madde içeriğine kadar kurutulması amacıyla işletilen solar kurutma sisteminin ise 12 holden oluştuğu ve toplam 120 ton/gün kapasiteye sahip olduğu öğrenilmiştir. İzmir Belediyesi tarafından işletilen Havza Solar Kurutma Tesisi'nin de evsel nitelikli arıtma çamurların kurutulması amacıyla 12 m genişliğinde ve 120 metre uzunluğunda tasarlandığı 5.5 ton/gün kapasiteye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda 10 ton/gün çamurun kurutulması için solar kurutma sisteminin 12 m genişlik ve 100-150 m uzunluğa sahip bir hol olarak inşa edilmesi gerektiği sonucuna varılmış ve Redco firması yetkilileri ile görüşülerek 150 m uzunluğa sahip bir holde yaklaşık 10 ton/gün çamurun kurutulabileceği bilgisi teyit edilmiştir. Bu doğrultuda 150 ton/gün çamurun kurutulması içim 12 m genişlik ve 150 m uzunluğa sahip 15 hol kullanılması gerektiği hesaplanmıştır. Bu durumda 150 ton/gün çamurun kurutulması için gerekli toplam uygulama alanı 27000 m^2 olarak hesaplanmıştır.

Ülkemizde bulunan solar kurutma uygulamalarında polikarbonat levha ile çevrili bir serada zemine serilen çamur, doğrudan güneş radyasyonu etkisine bırakılmaktadır. Firma yetkililerinden alınan bilgilere göre en fazla 50 cm kalınlığında zemine serilen çamur, çamur karıştırma makineleri ile karıştırılarak, alttaki nemli kısmın üste alınması ve üstü kurumuş kısmın alta alınması sağlanmaktadır. Solar kurutma sistemlerinde kullanılan bir diğer ekipman fanlar olup, güneş enerjisinin etkisiyle buharlaşan çamur suyunun sera tavanına 10 metre aralıklarla yerleştirilen sirkülasyon fanları yardımıyla suya doymuş buhar sistemden uzaklaştırılmakta ve tekrar sisteme taze hava sağlanmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda solar kurutma yönteminde elektrik harcayacak ekipmanların çamur karıştırma makineleri ve fanlar olduğu belirlenmiştir.

Redco firması yetkililerinden alınan gerçek uygulamalara ait teknik dizayn tablosuna göre 48 m uzunluğuna sahip bir solar kurutma alanı için 1 adet çamur karıştırma makinesi gerektiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 150 m uzunluğunda bir solar kurutma holü için yaklaşık 3 adet çamur karıştırma makinesi gerektiği hesaplanmıştır. Firmadan alınan bilgilere göre fanlar 10 m aralıklarla yerleştirildiği için 150 m uzunluğunda bir solar kurutma holü için gerekli fan sayısı 15 olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, yine firmadan alınan çamur karıştırma makinesi ve fan teknik özelliklerine göre günlük toplam elektrik tüketimi 6750 kW olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Solar kurutma için kullanılan ekipmanların teknik özellikleri ve tüketilen enerji hesabı

Ekipman	**Çamur Karıştırma Makinesi**	**Fan**
Kurulu Güç (kWs/adet)	16	0.55
Çekilen Güç (kWs/adet)	12.8	0.44
Günlük İşletme Süresi (saat)	10	10
1 hol için gerekli ekipman sayısı	3	15
1 hol için elektrik tüketimi (kW/gün)	384	66
15 hol için alan gereksinimi (m^2)	5760	990
Toplam elektrik tüketimi (kW/gün)	**6750**	

4.1.2. Bantlı kurutma enerji tüketim miktarı

Ana senaryo kapsamında incelenen bantlı kurutucu kullanılması durumunda elektrik enerjisi tüketimine ek olarak doğalgaz tüketimi gerçekleşeceği belirlenmiştir. Birçok farklı uygulama örnekleri incelenmiş olup, Redco firması yetkilileri tarafından elde edinilen bilgiler dahilinde, gerçekleştirilmesi planlanan senaryo kapsamında 6.25 ton/saat kapasiteli 25 m uzunluğunda olan bir adet bantlı kurutucu tercih edilmiştir (Redco 2023). 150 ton/gün çamuru istenilen kuruluğa ulaştırmak için 24 saat/gün çalıştırılacaktır. Bu bilgilere göre çamurun bantlı kurutucu ile kurutulması için gerekli toplam uygulama alanı 200 m^2 olarak hesaplanmıştır.

Helezonlu bir nakliye aracı ile kurutulmuş çamurun bant üzerine yayılması ile başlayan kurutma süreci, yaklaşık 110-130 °C'ye ulaşan sıcak havanın sirkülasyon fanları üzerinden bant üzerindeki çamura aktarılması sonucu çamurun ve bandın ısıtılması sağlanır. Termal yağın ısıtılması sonucunda sıcak hava istenilen dereceye ulaşmaktadır. Sirkülasyon havası vantilatörleri, sistem içerisinde oluşan sıcak havayı bant altından uzaklaştırmaktadır. Bantlı kurutucu bileşenleri temel olarak, atık hava vantilatörü çamur içerisinden alınan buharlaşan suyun uzaklaştırılmasında kullanılırken, soğuk hava vantilatörü ile tesise taze hava verilmekte ve nihai ürün olan kurutulmuş çamur soğutulmaktadır. Isıtma sistem ise uygun sıcaklık değerini sağlayarak gerekli olan kurutma kapasitesinin yakalanması için gereklidir. Bu süreç içerisinde elektrik enerjisi, termal enerji ve doğalgaz kullanımı mevcuttur. Termal enerji hafif yakıtların yakılması ile elde edilmektedir.

Redco firmasından elde edilen bilgilere göre 150 ton arıtma çamurunun bantlı kurutucu ile kurutulması sonucu gerçekleşecek elektrik, termal enerji ve doğalgaz tüketimleri hesabında kullanılan veriler Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Bantlı kurutma sırasında enerji tüketimleri ve tüketilen enerji hesabı

Tüketilen Kaynak	**Değer**
Elektrik Tüketimi (kWh/kg buharlaşan su)	0.07
Termal Tüketimi (kWh/kg buharlaşan su)	0.65
Doğalgaz Tüketimi (Nm^3/h)	42.7
Alan Gereksinimi (m^2)	200
Günlük Çalışma Süresi (saat)	24

4.1.3. Akışkan yataklı kurutma enerji tüketim miktarlarının belirlenmesi

Ana senaryo kapsamında incelenen akışkan yataklı kurutucuda, ısıtılan havanın dolaylı olarak çamur üzerine aktarılmasıyla kurutma ünitesinin her noktasında 85 °C'lik kurutma sıcaklığı sağlanmaktadır. Birçok farklı firma yetkilileri tarafından elde edinilen bilgiler sonucunda, gerçekleştirilmesi planlanan senaryo kapsamında 10 ton/saat kapasiteli bir adet akışkan yataklı kurutucu tercih edilmiş olup, 150 ton/gün çamuru istenilen kuruluğa ulaştırmak için 15 saat/gün çalıştırılacaktır. Seçilen akışkan yataklı kurutucu 25 m uzunluğuna ve 8 m genişliğe sahip olduğu için gerekli toplam uygulama alanı 200 m^2 olarak hesaplanmıştır. Akışkan yataklı kurutucuda çamurun kurutulması sırasında bantlı kurutucuya benzer şekilde elektrik, termal enerji ve doğalgaz tüketimleri gerçekleşecek olup, Redco firmasından alınan bilgilere göre bu kaynakların tüketim hesapları Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. Akışkan yataklı kurutma sırasında enerji tüketimleri ve tüketilen enerji hesabı

Tüketilen Kaynak	**Değer**
Elektrik Tüketimi (kWh/kg buharlaşan su)	0.07
Termal Tüketimi (kWh/kg buharlaşan su)	1.05
Doğalgaz Tüketimi (Nm^3/h)	68.98
Alan Gereksinimi (m^2)	200
Günlük Çalışma Süresi (saat)	15

4.1.4. Döner kurutma enerji tüketim miktarlarının belirlenmesi

Ana senaryo kapsamında incelenen döner kurutucunun kullanımı sırasında arıtma çamurunun besleneceği tamburun ısıtılması için kömür kullanılmakta olup, yanma fırınında elde edilen ısı, fanlar ile kurutma tamburuna yönlendirilmekte ve kurutma işleminin ardından siklondan geçirilecek partiküller tutulmaktadır. 150 ton arıtma çamurunun kurutulması için kullanılması gereken tambur kurutma ünitesinin kapasitesinin 6.25 ton/saat olduğu belirlenmiştir. Seçilen döner kurutucu 34 m

uzunluğuna ve 4 m genişliğe sahip olduğu için gerekli toplam uygulama alanı 136 m^2 olarak hesaplanmıştır. Döner kurutucuda çamurun kurutulması sırasında elektrik, termal enerji tüketilecek olup, Redco firmasından alınan bilgilere göre bu kaynakların tüketim hesapları Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.4. Döner kurutucu enerji tüketim verileri

Tüketilen Kaynak	**Değer**
Elektrik Tüketimi (kWh/kg buharlaşan su)	0.05
Termal Tüketimi (kWh/kg buharlaşan su)	0.85
Alan Gereksinimi (m^2)	136
Günlük Çalışma Süresi (saat)	24

Dört farklı kurutma teknolojisi için çevresel etkilerin belirlenmesine yönelik envanterin oluşturulması için hesaplanan alan kullanımı, enerji tüketimleri ve salınan emisyonlarına ait tüm girdi ve çıktı verileri fonksiyonel birime göre Çizelge 4.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5. Ana senaryolar için yaşam döngüsü envanteri

	Bantlı Kurutucu	**Akışkan Yataklı Kurutucu**	**Döner Kurutucu**	**Solar Kurutucu**
Girdiler				
Fonksiyonel birim (Kurutulan tKM)	150			
Elektrik talebi (kWh/kg buharlaşan su)	0.07	0.07	0.05	0.072
Termal elektrik talebi (kWh/kg buharlaşan su)	0.65	1.05	0.85	-
Alan gereksinimi (m^2)	200	200	136	27000
Çıktılar				
Buharlaşan su miktarı (kg)	94.086			
Havaya Salınan Emisyonlar				
Amonyak (NH_3) (kg/FU)	0.23			0.443
Metan (CH_4) (kg/FU)	0.68			
NMVOC (kg/FU)	19.02			
Karbonmonoksit (CO) (kg/FU)	0.80			

4.2. Ana senaryo için yaşam döngüsü etki analizi

4.2.1. Çamur kurutmadan kaynaklanan küresel ısınma potansiyelleri

Ana senaryo için her kurutma teknolojisinin ReCiPe 2016, EF 3.0, ILCD ve IPCC 2021 AR 6 metodolojileri kullanılarak hesaplanan küresel ısınma potansiyelleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. 1 ton çamurun %20'den %90'a kadar kurutulmasıyla küresel ısınma potansiyeli KM (kg CO_2e/ton KM)

Metodoloji	Etki Kategorisi	Bantlı Kurutucu	Akışkan Yataklı Kurutucu	Döner Kurutucu	Solar Kurutucu
ReCiPe Orta nokta (H)	İklim Değişikliği Potansiyeli	328.67	442.28	344.36	147.64
EF 3.0	İklim Değişikliği	331.00	445.42	346.81	148.67
ILCD	İklim Değişikliği	321.42	432.52	336.75	144.39
IPCC 2021 AR6	İklim Değişikliği Potansiyeli 100	324.39	436.42	339.77	145.88
Ortalama		326.37	439.16	341.93	146.64

Doğrudan çamur kurutmaya odaklanan kısıtlı çalışma olduğu için sonuçların karşılaştırılması kısıtlı olmuştur. Daha önce benzer çalışma sadece bantlı kurutucu için yürütülmüş olup, Stefaniak vd. (2014) tarafından Bantlı kurutucu için 352.36 kWh/tKM enerji tüketimi sonunda oluşan sera gazı emisyonları 107.61 kg CO_2e/tKM olarak belirlenmiştir. Chen vd. (2016), tarafından termal kurutmada 104.20 kWh/tKM elektrik tüketimi sonucu oluşan sera gazı emisyon miktarı 4.599 kg CO_2eş/tKM olarak rapor edilmiştir. Houillon ve Jolliet (2005) tarafından yürütülen çalışmada ise; termal kurutma sırasında oluşan sera gazı emisyon miktarı 997 kg CO_2e/tKM olarak rapor edilmiştir. Rapor edilen değerler bu çalışmada en düşük sera gazı emisyonuna sahip termal kurutma işlemi olan bantlı kurutma için hesaplanan ortalama 326.37 kg CO_2e/tKM değerinden oldukça farklıdır. En düşük sera gazı emisyonu salınımı olan bantlı kurutucu yerine solar kurutucu kullanılması sera gazı emisyonlarında %44 azalma sağlamaktadır. Bu değer Rehl ve Muller (2011) tarafından hesaplanan %50 değerine yakındır. Nihai olarak, sera gazı emisyonları, en yüksek ve en düşük EF 3.0 ve ILCD ile tahmin edilirken, ReCiPe orta nokta (H) ile elde edilen küresel ısınma potansiyeli değeri, ortalamayı en iyi temsil eden değer olmuştur.

4.2.2. Çamur kurutmadan kaynaklanan çevresel etkiler

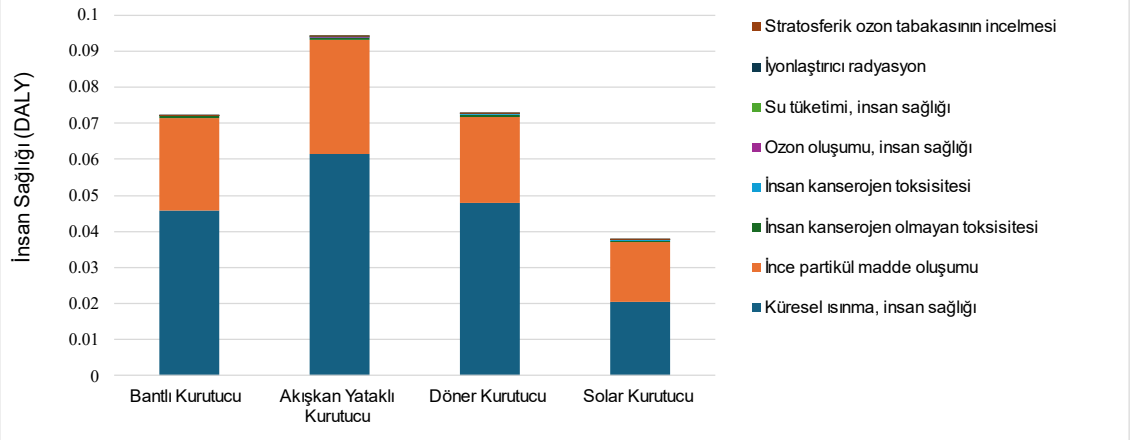
150 ton arıtma çamurunun %20 KM'den %90 KM'ye kadar kurutulması sürecini ele alan ana senaryolar için ReCiPe son nokta (H) metodolojisi kullanılarak gerçekleştirilen YDA çalışmaları sonucunda belirlenen yaşam döngüsü etkileri Çizelge 4.7'de görülmektedir. Farklı kurutma yöntemlerinden kaynaklanan çevresel etkilerin karşılaştırılması Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sunulmuştur. ReCiPe Son Nokta (H) metodolojisine göre, tüm kurutma teknolojilerinin en önemli etkileri, insan sağlığı hasar kategorisinde küresel ısınma (%55-63) ve ince partikül madde oluşumundan (%33-44) kaynaklanmaktadır (Şekil 4.1). Kurutma yöntemlerine ilişkin gerçekleştirilen ana senaryoda akışkan yataklı kurutucu en yüksek çevresel etkiye (9×10^{-2} DALY) sebep olurken, solar kurutma en düşük etkiye (3.76×10^{-2} DALY) yol açmıştır.

Kaynak tüketimi hasar kategorilerine ilişkin değerlendirmede de benzer şekilde en yüksek çevresel etkinin akışkan yataklı kurutucudan (6.59×10^{3} USD2013) kaynakladığı belirlenmiştir. Kurutma yöntemlerinin çevresel etkilerinin insan sağlığı ve kaynak tüketimi hasar kategorilerinde bulunan benzer etki kategorilerinden

kaynaklandığı belirlenirken, ekosistem kalitesi hasar kategorisinde farklı etkiler gözlemlenmiştir (Şekil 4.2).

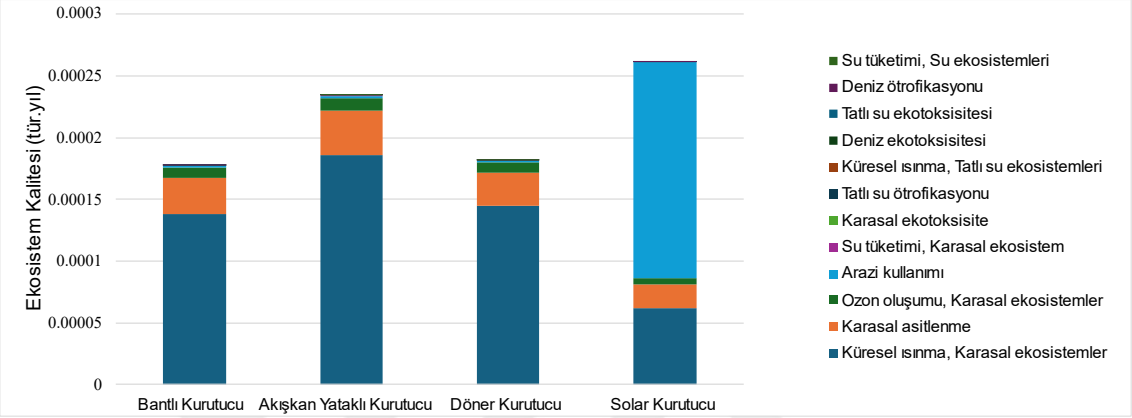
Çizelge 4.7. Ana senaryo için YDA sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Bantlı Kurutucu	Akışkan Yataklı Kurutucu	Döner Kurutucu	Solar Kurutucu
Küresel ısınma, insan sağlığı	DALY	4.58×10^{-2}	6.16×10^{-2}	4.79×10^{-2}	2.06×10^{-2}
İnce partikül madde oluşumu	DALY	2.56×10^{-2}	3.15×10^{-2}	2.39×10^{-2}	1.65×10^{-2}
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi	DALY	6.49×10^{-4}	7.86×10^{-4}	5.95×10^{-4}	4.37×10^{-4}
İnsan kanserojen toksisitesi	DALY	6.86×10^{-5}	8.96×10^{-5}	6.92×10^{-5}	3.54×10^{-5}
Ozon oluşumu, insan sağlığı	DALY	5.59×10^{-5}	7.13×10^{-5}	5.57×10^{-5}	3.16×10^{-5}
Su tüketimi, insan sağlığı	DALY	4.40×10^{-5}	3.72×10^{-5}	2.48×10^{-5}	5.65×10^{-5}
İyonlaştırıcı radyasyon	DALY	1.03×10^{-5}	1.23×10^{-5}	9.26×10^{-6}	7.15×10^{-6}
Stratosferik ozon tabakasının incelmesi	DALY	3.67×10^{-6}	4.81×10^{-6}	3.72×10^{-6}	1.87×10^{-6}
Küresel ısınma, Karasal ekosistemler	tür.yıl	1.38×10^{-4}	1.86×10^{-4}	1.45×10^{-4}	6.20×10^{-5}
Karasal asitlenme	tür.yıl	2.93×10^{-5}	3.59×10^{-5}	2.73×10^{-5}	1.90×10^{-5}
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler	tür.yıl	8.28×10^{-6}	1.05×10^{-5}	8.26×10^{-6}	4.77×10^{-6}
Arazi kullanımı	tür.yıl	1.61×10^{-6}	1.66×10^{-6}	1.15×10^{-7}	1.75×10^{-4}
Su tüketimi, Karasal ekosistem	tür.yıl	2.68×10^{-7}	2.26×10^{-7}	1.51×10^{-7}	3.44×10^{-7}
Karasal ekotoksisite	tür.yıl	1.97×10^{-7}	2.39×10^{-7}	1.81×10^{-7}	1.34×10^{-7}
Tatlı su ötrofikasyonu	tür.yıl	7.32×10^{-8}	8.86×10^{-8}	6.72×10^{-8}	4.94×10^{-8}
Küresel ısınma, Tatlı su ekosistemleri	tür.yıl	3.77×10^{-9}	5.08×10^{-9}	3.95×10^{-9}	1.69×10^{-9}
Deniz ekotoksisitesi	tür.yıl	1.55×10^{-9}	1.92×10^{-9}	1.47×10^{-9}	9.74×10^{-10}
Tatlı su ekotoksisitesi	tür.yıl	1.42×10^{-9}	1.77×10^{-9}	1.35×10^{-9}	8.66×10^{-10}
Deniz ötrofikasyonu	tür.yıl	9.32×10^{-10}	1.13×10^{-9}	8.54×10^{-10}	6.31×10^{-10}
Su tüketimi, Su ekosistemleri	tür.yıl	1.20×10^{-11}	1.01×10^{-11}	6.76×10^{-12}	1.54×10^{-11}
Fosil kaynak kıtlığı	USD2013	4.72×10^{3}	6.59×10^{3}	5.17×10^{3}	1.73×10^{3}
Mineral kaynak kıtlığı	USD2013	1.15	1.40	1.06	7.66×10^{-1}



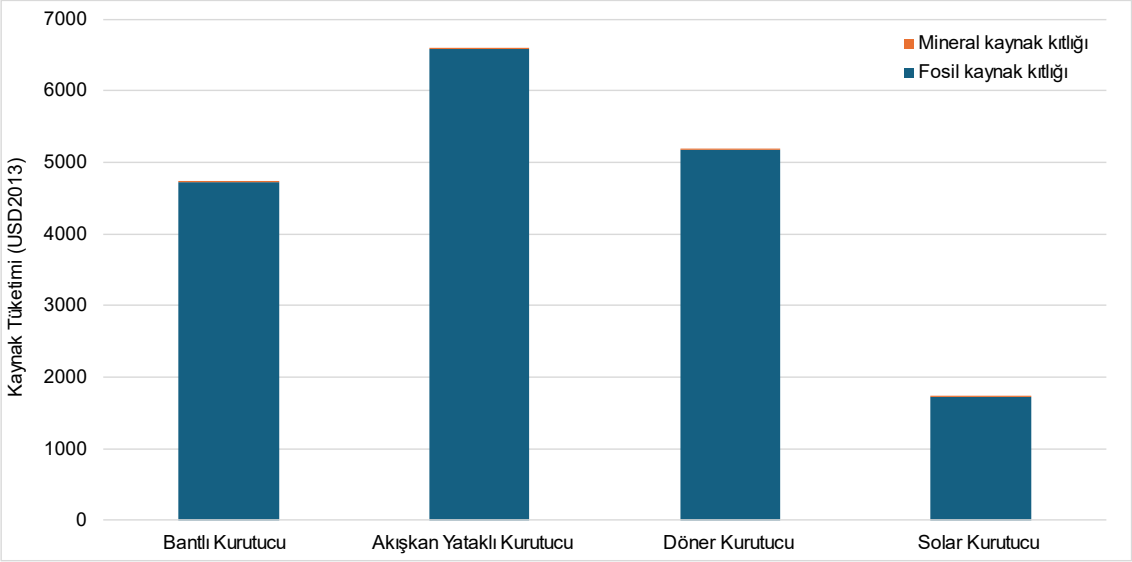
Şekil 4.1. ReCiPe son nokta (H) metodolojisine göre kurutma yöntemlerinin insan sağlığı hasar kategorisindeki yaşam döngüsü etkileri

Genel olarak ekosistem kalitesi hasar kategorisinde en düşük çevresel etkinin bantlı kurutucudan kaynaklandığı belirlenirken, en yüksek etkinin solar kurutmadan kaynaklandığı belirlenmiştir. Ekosistem kalitesi hasar kategorisinde, bantlı kurutucu, akışkan yataklı kurutucu ve döner kurutucu teknolojilerinde ana etki kaynağı küresel ısınma (%78-80) olmuştur. Termal kurutmadan farklı olarak, solar kurutmanın uygulandığı senaryoda; ekosistem kalitesi hasar kategorisinde en yüksek etkinin (2.62×10^{-4} tür.yıl) arazi kullanımından (%67) kaynaklandığı hesaplanmıştır. Küresel ısınma potansiyelinin ise %24'lük bir etki ile solar kurutma sürecindeki en yüksek ikinci etkiye sahip olduğu hesaplanmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. ReCiPe son nokta (H) metodolojisine göre kurutma yöntemlerinin ekosistem kalitesi hasar kategorisindeki yaşam döngüsü etkileri

Enerji yoğun kurutma işlemlerinde beklendiği gibi, kaynak tüketimi hasar kategorisine katkıda bulunan ana etki kategorisi, tüm kurutma teknolojilerinde fosil kaynak kıtlığı (%99.99) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. ReCiPe son nokta (H) metodolojisine göre kurutma yöntemlerinin kaynak tüketimi hasar kategorisindeki yaşam döngüsü etkileri

Gerçekleştirilen hasar kategorileri değerlendirmesine sonucunda akışkan yataklı kurutucuların her kategoride en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple çalışmanın devamında yürütülen yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimi ve kurutulmuş çamurun nihai katı madde içeriğinin azaltılmasına yönelik senaryo çalışmalarında akışkan yataklı kurutucular dahil edilmemiştir.

4.3. Çamur Kurutma Senaryolarının Yaşam Döngüsü Etkileri

Yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimi ve kurutulmuş çamurun nihai katı madde içeriğinin azaltılmasına yönelik oluşturulan sekiz senaryo; bantlı kurutucu, döner kurutucu ve solar kurutma teknolojilerine uygulanmıştır. Sekiz senaryoya göre insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi hasar kategorilerinde elde edilen etkileri hesaplanmıştır.

Senaryo 0 (S0); %20 KM içeriğine sahip arıtma çamurunun %90 KM içeriğine ulaşması için gerçekleştirilen farklı kurutma teknolojilerine ilişkin gerçekleştirilen YDA'yı içermektedir. S0 kapsamında gerçekleştirilen değerlendirmede, insan sağlığı hasar kategorisinde 3.76×10^{-2} DALY ve kaynak tüketimi hasar kategorisinde 1.73×10^{3} USD2013 ile en düşük çevresel etkinin solar kurutucu ile elde edilirken, ekosistem kalitesi hasar kategorisinde 2.62×10^{-4} tür.yıl ile solar kurutucunun en yüksek çevresel etkiyi oluşturduğu hesaplanmıştır. Solar kurutucunun, ekosistem kalitesi hasar kategorisinde yüksek çevresel etkiye sahip çıkmasının nedeni, solar kurutucu için alan kullanımının fazla olmasıdır.

***Senaryo 1 (S1)*;** Çamur kurutma sırasında açığa çıkan gazların tamamının filtrede tutulduğu kabulünün yapıldığı YDA'yı içermektedir. Üç farklı kurutma teknolojisinde hesaplanan hasar kategorilerinden; insan sağlığı hasar kategorisinde (3.75×10^{-2} DALY) ve kaynak tüketimi hasar kategorisinde (1.73×10^{3} USD2013) kategorilerinde en düşük çevresel etkinin solar kurutmadan kaynaklandığı, ekosistem kalitesi hasar kategorisinde ise solar kurutucunun 2.61×10^{-4} tür.yıl ile en yüksek çevresel etkiyi oluşturduğu hesaplanmıştır. S0 ile benzer sonuçların elde edildiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, kurutma sürecinde oluşan gazların, filtrede toplanması ve atmosfere salınımın önlenmesinin (S1); insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi hasar kategorilerinde oluşan çevresel yükün azaltılmasında, herhangi bir olumlu katkı sağlamadığı sonucuna varılmıştır.

Senaryo 2(S2); kurutucu teknolojilerinde tüketilen elektrik miktarının %50'sinin fotovoltaik enerji ile desteklenmesi kabulünün yapıldığı YDA'yı içermektedir. Elektrik talebinin, yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması, beklenildiği üzere her etki kategorisindeki YDA sonuçlarının, önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlamıştır. İnsan sağlığı hasar kategorisinde 1.22×10^{-2} DALY ve kaynak tüketimi hasar kategorisinde 8.69×10^{2} USD2013 ile üzere en düşük etki, solar kurutmadan kaynaklanmıştır. Ekosistem kalitesi hasar kategorisinde ise en düşük etki 9.62×10^{-5} tür.yıl ile bantlı kurutmadan kaynaklanmıştır.

Senaryo 3 (S3); tüketilen elektriğin %50'sinin rüzgâr enerjisinden karşılanması kabulünün yapıldığı YDA'yı içermektedir. Bu senaryo ile S2'de olduğu gibi; insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi hasar kategorilerindeki etkilerin azaltılmasına katkı sağlanmıştır. İnsan sağlığı hasar kategorisinde 1.89×10^{-2} DALY ve

kaynak tüketimi hasar kategorisinde 8.65×10^{2} USD2013 olarak en düşük çevresel etkilerin, solar kurutma teknoloji ile gerçekleştirilen senaryoya ait oluştuğu hesaplanmıştır. Ekosistem kalitesi hasar kategorisinde ise en düşük çevresel etkinin 1.36×10^{-4} tür.yıl ile bantlı kurutma ile elde edildiği hesaplanmıştır. Özellikle elektrik ihtiyacının ön planda olduğu bantlı kurutucu ve döner kurutucu teknolojilerine bağlı oluşan etkilerin azaltılması için, S2 ve S3 senaryolarının tercih edilebilir olan önemli stratejiler olduğu sonucuna varılmıştır.

Senaryo 4 (S4) ile arıtma çamuru KM içeriğinin %80'e kadar kurutulması ve ***Senaryo 5(S5)*** ile KM içeriğinin %60'a kadar kurutulması stratejilerine ilişkin yaşam döngüsü analizi gerçekleştirilmiştir. KM içeriğinin azaltılmasıyla birlikte enerji tüketimi ve salınan emisyon miktarında azalma meydana gelmektedir. Enerji tüketimlerindeki azalmaya bağlı olarak, yapılan YDA sonucunda etki kategorilerinin çevresel etkilerinin azaldığı belirlenmiştir. Diğer senaryolarda elde edilen kategori etkilerine benzer olarak S4 ve S5 için, en düşük çevresel etkiler insan sağlığı hasar kategorisinde sırasıyla 3.63×10^{-2} DALY ve 3.24×10^{-2} DALY olarak solar kurutma teknolojisi için hesaplanmıştır. Kaynak tüketimi hasar kategorisinde en düşük çevresel etkiler ise S4 ve S5 için sırasıyla, 1.67×10^{3} USD2013 ve 1.48×10^{3} USD2013 olarak, solar kurutma teknolojisi ile gerçekleştirilen senaryoya için hesaplanmıştır. Ekosistem kalitesi hasar kategorisinde ise oluşan en düşük çevresel etkilerin, S4 için 1.72×10^{-4} tür.yıl ve S5 için 1.72×10^{-4} tür.yıl olarak bantlı kurutma ile elde edildiği hesaplanmıştır.

Arıtma çamurunun yasal düzenlemeler ve yönetmelikler tarafından yakma tesisine gönderilmesi için %90 KM içeriğine sahip olması gerekmektedir. Bu doğrultuda; %80 ve %60 KM içeriğine sahip senaryoların (S4 ve S5), nihai bertaraf amacıyla alternatif uygulamaların söz konusu olması durumunda çevresel etkileri azaltmak için uygulanabilir stratejiler olabileceği sonucuna varılmıştır.

Senaryo 6 (S6) ile arıtma çamuru kurutma sürecinde kullanılan termal enerjinin yani proses buharının %50'sinin evsel atıkların yakılmasından karşılandığı kabulü yapılmıştır. Bu senaryonun da insan sağlığı ve ekosistem kalitesi hasar kategorilerinde oluşan çevresel yükün azaltılmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. İnsan sağlığı ve kaynak tüketimi hasar kategorilerine ilişkin en düşük sonuçlar sırasıyla, 3.76×10^{-2} DALY ve 1.73×10^{3} USD2013 ile solar kurutma teknolojisinin uygulandığı kurutma yöntemi için hesaplanmıştır. Ekosistem kalitesi hasar kategorisinde ise oluşan en düşük çevresel etki 1.59×10^{-4} tür.yıl olarak döner kurutma için hesaplanmıştır.

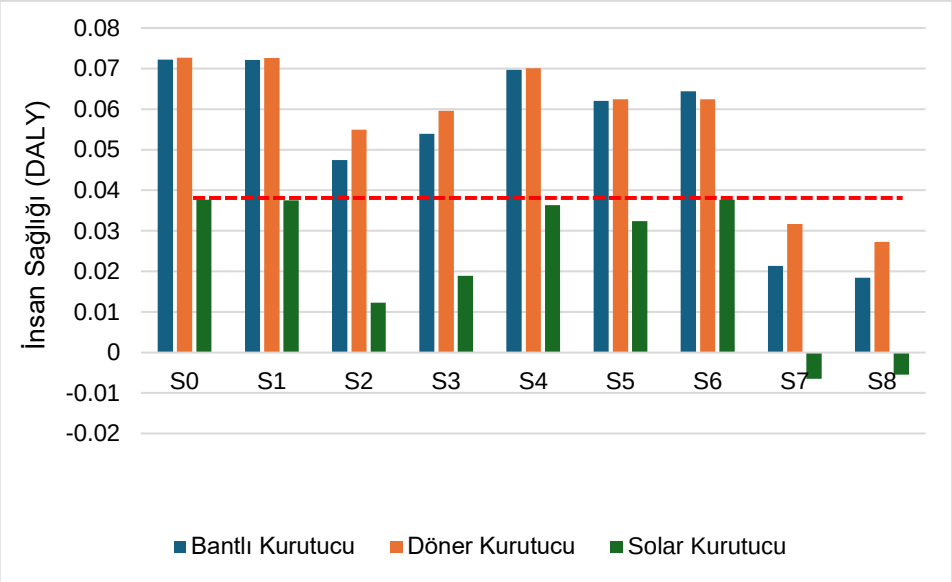
S1 ve S6 arasında yer alan senaryolar karşılaştırıldığında insan sağlığı ve ekosistem kalitesi hasar kategorilerinde en etkili senaryoların, elektrik talebinin %50'sinin fotovoltaik enerji (S2) veya rüzgâr enerjisinden (S3) karşılanması olarak belirlenmiştir. Isı enerjisinin %50'sinin evsel atıkların yakılmasından karşılanmasının (S6) ise, kaynak tüketimi hasar kategorisinde oluşan çevresel etkilerin azaltılmasında en etkili senaryo olduğu belirlenmiştir.

Senaryo 7 (S7) elektrik enerjisinin tamamının fotovoltaik enerjiden ve ısı enerjinin %50'sinin evsel atıkların yakılmasından karşılanması kabullerini içermektedir. ***Senaryo 8 (S8)*** ise S7'de yapılan kabullere ek olarak çamurun %90 KM içeriğine kadar kurutulması yerine %60 KM içeriğine kadar kurutulması kabulünün de yapıldığı senaryodur. Her iki senaryoda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; insan sağlığı,

ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi hasar kategorilerinde oluşan çevresel etkilerin azaltılmasında en etkili senaryolar oldukları belirlenmiştir.

4.3.1. Çamur kurutma senaryolarının insan sağlığı hasar kategorisine etkileri

İncelenen çamur kurutma senaryolarının insan sağlığı hasar kategorisine etkileri Şekil 4.4'te görülmektedir. İnsan sağlığı kategorisinde yer alan etkilerin ortak birim olarak değerlendirilmesi için ortak birim olarak İnsan sağlığı üzerindeki etki (Disability adjusted life years; DALY) kullanılmaktadır.



Şekil 4.4. Çamur kurutma senaryolarının insan sağlığı hasar kategorisine etkileri

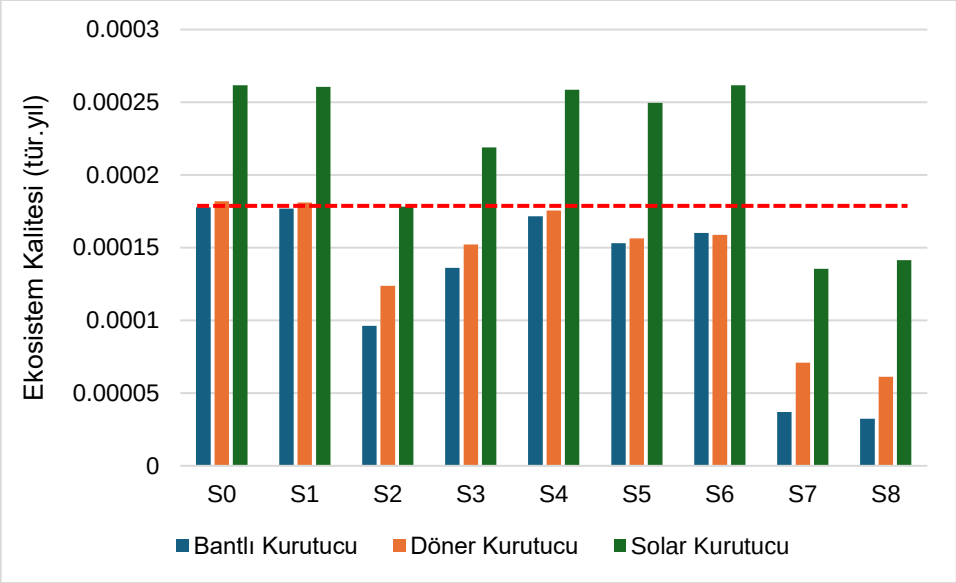
İncelenen çamur kurutma senaryolarının farklı çamur kurutma teknolojilerinin insan sağlığı hasar kategorisine etkileri, ana senaryoda (S0) en düşük çevresel etkiye sahip olan duruma göre değerlendirilmiştir. İnsan sağlığı hasar kategorisine ait sonuçlar incelendiğinde, S1 ve S4 senaryolarının uygulanmasının, oluşan etkileri azaltmak için olumlu bir etki ortaya koymadığı belirlenmiştir. S2 ve S3 stratejileri, oluşan etkileri azaltmak için olumlu katkı sağlasa da, bu senaryolar ile çevresel etkilerin solar kurutma ana senaryosunda oluşan çevresel etki seviyesine kadar azaltılamadığı gözlemlenmiştir. S5 stratejisi ile insan sağlığı hasar kategorisinde oluşan etkilerde, kayda değer azalma elde edilebilir olmasına rağmen, %60 KM içeriğine sahip arıtma çamurunun yasal çerçeveler kapsamında bertarafının gerçekleştirilmesi ve kullanılması tercih edilmemektedir.

S6 stratejisinde termal enerjinin %50'sinin evsel atıkların yakılmasından karşılanması, bantlı kurutucu ve döner kurutucuda oluşan etkileri azaltsa da, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı stratejiler kadar etkili olmamıştır. Solar kurutma yönteminde, termal enerjinin evsel atıkların yakılmasından karşılanması söz konusu olmadığı için ana senaryoda ve S6'da elde edilen solar kurutucu etkileri birbirine eşittir.

Elektrik talebinin tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması ve ısı enerjisi talebinin yarısının atık yakma yoluyla karşılanması durumunda (S7 ve S8) termal kurutma teknolojilerinin çevresel etkilerinin solar kurutma kullanılmasıyla elde edilen seviyelere indirilebileceği belirlenmiştir. S7 ve S8 için insan sağlığı hasar kategorisinde oluşan negatif değerli sonuçların temel etkeni, tüketilen yenilenebilir enerji kaynaklarının su tüketiminin negatif çıkmasıdır.

4.3.2. Çamur kurutma senaryolarının ekosistem kalitesi hasar kategorisine etkileri

Çamur kurutma senaryoları için gerçekleştirilen YDA çalışmasında belirlenen ekosistem kalitesi hasar kategorisine etkiler Şekil 4.5'te görülmektedir. Ekosistem kalitesi kategorisinde yer alan etkilerin ortak birim olarak değerlendirilmesi için ortak birim olarak "tür.yıl (species.yr)" kullanılmaktadır.



Şekil 4.5. Çamur kurutma senaryolarının ekosistem kalitesi hasar kategorisine etkileri

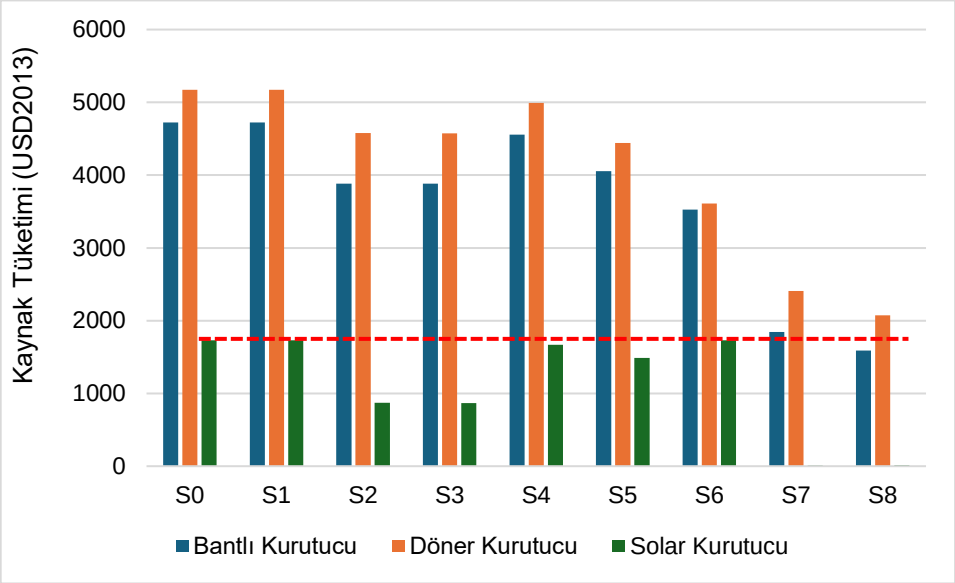
Ekosistem kalitesi hasar kategorisinde, en düşük çevresel etkilerin, S7 ve S8 senaryolarının uygulanması ile elde edilebileceği belirlenmiştir. S8 stratejisi kapsamında %60 KM içeriğine sahip olacak şekilde kurutma uygulanmasının, bantlı kurutucu ve döner kurutucu teknolojilerinde oluşan çevresel etkileri azaltmak için en uygun strateji olduğu belirlenmiştir. Ancak, S8'in tercih edilebilir bir strateji olarak kullanılabilmesi için alternatif bertaraf yöntemlerinin geliştirilmesi ve yasal düzenlemelerin oluşturulması gerekmektedir.

S2 ve S3 stratejilerinin (elektrik ihtiyacının %50'sinin fotovoltaik ve rüzgâr enerjisinden karşılanması) bantlı ve döner kurutucu teknolojilerinin kullanıldığı kurutma işlemlerinde, ekosistem kalitesi hasar kategorisi etkilerini azaltılmak için tercih edilebilir stratejiler olduğu belirlenmiştir. Solar kurutma teknolojisinin, kategori kapsamında benzer en düşük etkilere sahip olması için S7 ve S8 stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Sonuç olarak ısı enerjisinin yarısının ve elektrik enerjinin tamamının sırasıyla atıkların yakılmasından ve yenilenebilir enerji kaynaklarından

karşılandığı senaryo (S7) çamur kurutmanın çevresel etkilerini azaltmak için en uygun senaryo olduğu sonucuna varılmıştır.

4.3.3. Çamur kurutma senaryolarının kaynak tüketimi hasar kategorisine etkileri

Bantlı kurutucu, döner kurutucu ve solar kurutucu teknolojileri ile oluşan çevresel etkilere farklı senaryoların uygulanması ile elde edilen YDA sonuçlarına göre; kaynak tüketimi hasar kategorisinde belirlenen etkiler Şekil 4.6'da görülmektedir. Kaynak tüketimi hasar kategorisinde yer alan etkilerin ortak birim olarak değerlendirilmesi için ortak birim olarak "2013 referans yılı Amerikan Doları (USD2013)" kullanılmaktadır.



Şekil 4.6. Çamur kurutma senaryolarının kaynak tüketimi hasar kategorisine etkileri

Kaynak tüketimi hasar kategorisinde, ana senaryoda (S0) solar kurutma uygulamasının, en düşük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. S7 ve S8 stratejilerinin uygulanması ile bantlı kurutucunun ortaya çıkardığı kaynak tüketimi hasar kategorisi etkileri, solar kurutmanın S0'da sebep olduğu hasar etkilerinden daha düşük seviyelere azaltılmaktadır. Ancak döner kurutucunun kaynak tüketimi hasar kategorisindeki etkilerin, S7 ve S8 stratejilerinin uygulanması durumunda bile, solar kurutmanın S0 stratejisinin sebep olduğu çevresel etki seviyesine kadar azaltılamadığı belirlenmiştir.

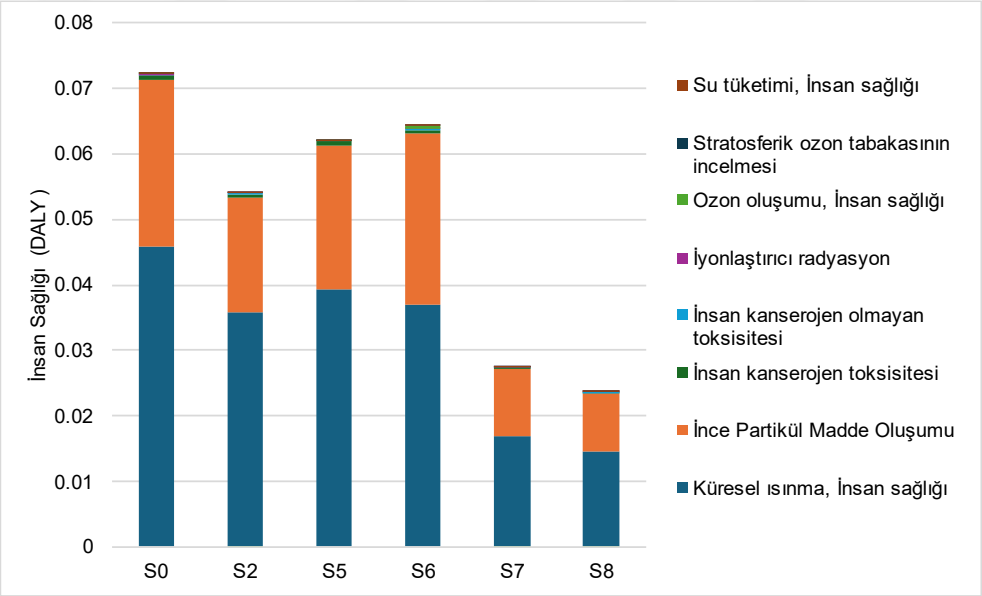
Termal enerji ve elektrik enerji talebinin yüksek olduğu bantlı kurutucu ve döner kurutucu teknolojilerinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve yakma işleminden elde edilen enerjinin kullanıldığı senaryo (S7), kaynak tüketimi hasar kategorisi etkilerini azaltmak için en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. Arıtma çamurunun %60 KM içeriğine kadar kurutulduğu S8 stratejisi uygulanması durumunda, kategoriye bağlı oluşan etkilerin daha fazla azaldığı gözlemlenmiştir. Bantlı kurutucu ve döner kurutucudaki enerji talebine bağlı olarak, beklendiği gibi kaynak tüketimi hasar kategorisindeki etkiler önemli ölçüde azalırken, solar kurutmanın kaynak tüketimi hasar kategorisindeki çevresel etkileri en düşük seviyededir.

4.4. Senaryoların Etki Kategorileri Açısından Değerlendirmesi

İnsan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi hasar kategorilerindeki YDA etkileri değerlendirildiğinde oluşturulan senaryolardan; S2, S5, S6, S7 ve S8'in çevresel etkileri azaltmak açısından en uygun senaryolar olduğu belirlenmiştir.

4.4.1. Bantlı Kurutucu senaryolarının etki kategorileri değerlendirmesi

Bantlı kurutucu ile çamur kurutmanın çevresel etkilerini azaltmak için incelenen senaryolarda etki kategorilerinin hesaplanan değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. İnsan sağlığı hasar kategorisi için yapılan değerlendirmede; küresel ısınma potansiyeli ve ince partikül madde oluşumu, değerlendirilen senaryolarda en yüksek etkiye sahip etki kategorileri olarak yer almaktadır. Özellikle S7'de yenilenebilir enerji kaynaklarından ve atıkların yakılmasından elektrik enerjisinin karşılandığı senaryonun oluşan çevresel etkileri azaltmak için en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. Bantlı kurutucu teknolojisine ilişkin insan sağlığı hasar kategorisindeki etki kategorilerinin dağılımı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



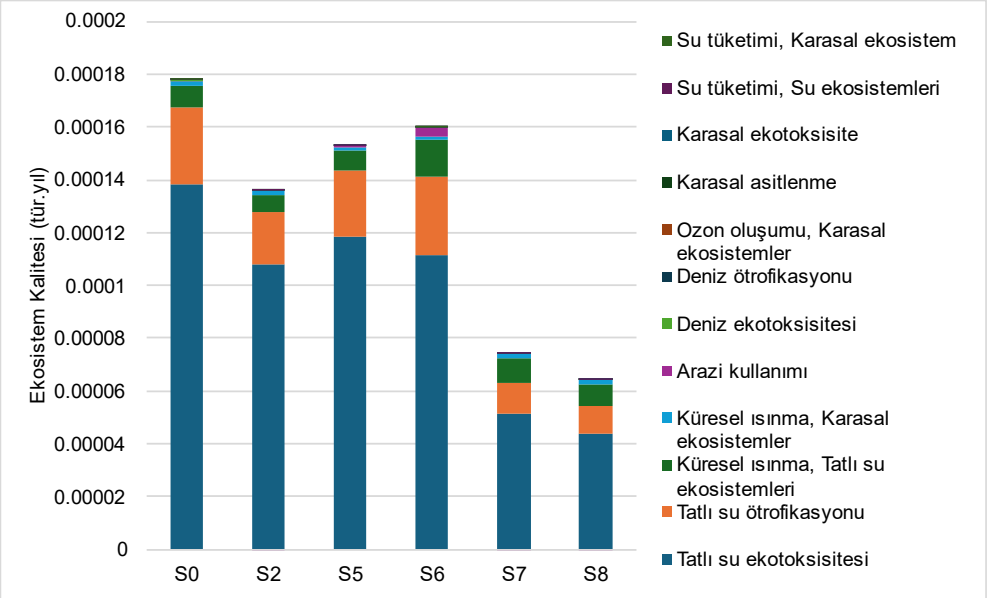
Şekil 4.7. Bantlı kurutucu insan sağlığı hasar kategorisi değerlendirmesi

Ekosistem kalitesi hasar kategorisi için yapılan değerlendirmeye göre, çevresel etkiye en yüksek katkıyı sırasıyla, tatlı su ekotoksisitesi, tatlı su ötrofikasyonu ve küresel ısınma (tatlı su ekosistemleri) etki kategorileri yapmaktadır. S6'da termal enerjinin %50'sinin atıkların yakılmasından karşılanması, çevresel etkileri azaltmak konusunda yeterli etkiyi göstermemiştir. Diğer senaryolardan farklı olarak, arazi kullanımına bağlı olarak oluşan etki söz konusudur.

Çizelge 4.8. Bantlı kurutucu senaryoları için yaşam döngüsü etki analizi sonuçları

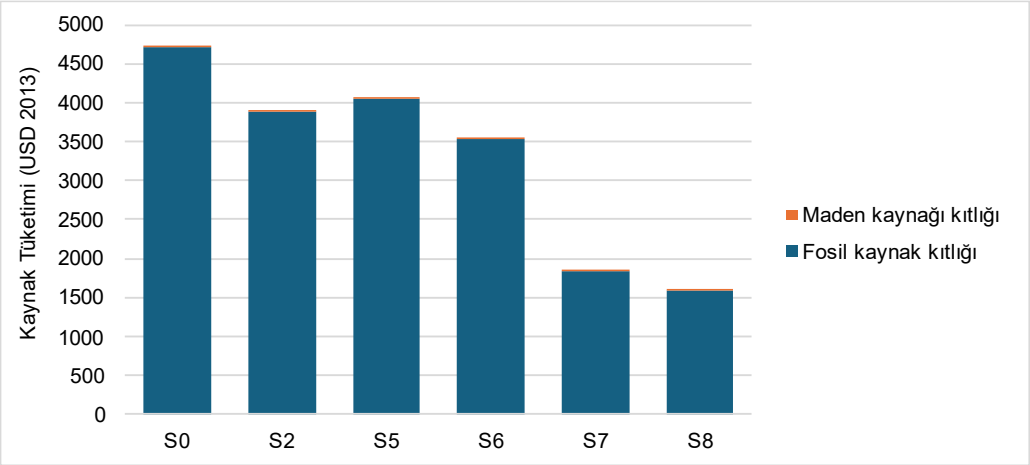
Etki Kategorisi	Senaryolar								
	S0	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S6**	**S7**	**S8**
İnsan sağlığı (DALY)									
Küresel ısınma, İnsan sağlığı	4.58×10^{-2}	4.57×10^{-2}	3.58×10^{-2}	3.58×10^{-2}	4.41×10^{-2}	3.93×10^{-2}	3.69×10^{-2}	1.69×10^{-2}	1.46×10^{-2}
İnce Partikül Madde Oluşumu	2.56×10^{-2}	2.56×10^{-2}	1.76×10^{-2}	1.76×10^{-2}	2.47×10^{-2}	2.20×10^{-2}	2.62×10^{-2}	1.02×10^{-2}	8.82×10^{-3}
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi	6.49×10^{-4}	6.49×10^{-4}	4.57×10^{-4}	4.36×10^{-4}	6.26×10^{-4}	5.57×10^{-4}	5.51×10^{-4}	1.46×10^{-4}	1.26×10^{-4}
İnsan kanserojen toksisitesi	6.86×10^{-5}	6.86×10^{-5}	7.51×10^{-5}	5.14×10^{-5}	6.62×10^{-5}	5.88×10^{-5}	5.71×10^{-5}	4.63×10^{-5}	3.98×10^{-5}
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı	5.59×10^{-5}	5.28×10^{-5}	4.22×10^{-5}	4.21×10^{-5}	5.41×10^{-5}	4.88×10^{-5}	9.28×10^{-5}	6.52×10^{-5}	5.68×10^{-5}
Su tüketimi, İnsan sağlığı	4.40×10^{-5}	4.40×10^{-5}	-6.57×10^{-3}	1.64×10^{-5}	4.24×10^{-5}	3.77×10^{-5}	5.48×10^{-4}	-6.09×10^{-3}	-5.22×10^{-3}
İyonlaştırıcı radyasyon	1.02×10^{-5}	1.02×10^{-5}	6.91×10^{-6}	6.77×10^{-6}	9.88×10^{-6}	8.79×10^{-6}	9.97×10^{-6}	3.15×10^{-6}	2.71×10^{-6}
Stratosferik ozon tabakasının incelmesi	3.67×10^{-6}	3.67×10^{-6}	2.79×10^{-6}	2.77×10^{-6}	3.54×10^{-6}	3.15×10^{-6}	3.76×10^{-6}	1.98×10^{-6}	1.70×10^{-6}
Ekosistem kalitesi (tür.yıl)									
Küresel ısınma, Karasal ekosistemler	1.38×10^{-4}	1.38×10^{-4}	1.08×10^{-4}	1.08×10^{-4}	1.33×10^{-4}	1.19×10^{-4}	1.11×10^{-4}	5.11×10^{-5}	4.40×10^{-5}
Karasal asitlenme	2.93×10^{-5}	2.92×10^{-5}	2.01×10^{-5}	2.01×10^{-5}	2.82×10^{-5}	2.52×10^{-5}	3.01×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.01×10^{-5}
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler	8.28×10^{-6}	7.57×10^{-6}	6.32×10^{-6}	6.30×10^{-6}	8.02×10^{-6}	7.26×10^{-6}	1.35×10^{-5}	9.56×10^{-6}	8.35×10^{-6}
Arazi kullanımı	1.61×10^{-6}	1.61×10^{-6}	1.62×10^{-6}	1.49×10^{-6}	1.60×10^{-6}	1.56×10^{-6}	1.56×10^{-6}	1.46×10^{-6}	1.44×10^{-6}
Su tüketimi, Karasal ekosistem	2.68×10^{-7}	2.68×10^{-7}	-3.99×10^{-5}	9.98×10^{-8}	2.58×10^{-7}	2.29×10^{-7}	3.33×10^{-6}	-3.70×10^{-5}	-3.17×10^{-5}
Karasal ekotoksisite	1.97×10^{-7}	1.97×10^{-7}	1.64×10^{-7}	1.33×10^{-7}	1.90×10^{-7}	1.69×10^{-7}	1.67×10^{-7}	6.95×10^{-8}	5.97×10^{-8}
Tatlı su ötrofikasyonu	7.32×10^{-8}	7.32×10^{-8}	6.28×10^{-8}	4.91×10^{-8}	7.06×10^{-8}	6.28×10^{-8}	6.20×10^{-8}	2.74×10^{-8}	2.35×10^{-8}
Küresel ısınma, Tatlı su ekosistemleri	3.77×10^{-9}	3.77×10^{-9}	2.95×10^{-9}	2.95×10^{-9}	3.64×10^{-9}	3.24×10^{-9}	3.04×10^{-9}	1.40×10^{-9}	1.20×10^{-9}
Deniz ekotoksisitesi	1.55×10^{-9}	1.55×10^{-9}	1.29×10^{-9}	1.08×10^{-9}	1.50×10^{-9}	1.34×10^{-9}	1.33×10^{-9}	5.97×10^{-10}	5.17×10^{-10}
Tatlı su ekotoksisitesi	1.42×10^{-9}	1.42×10^{-9}	1.58×10^{-9}	9.99×10^{-10}	1.37×10^{-9}	1.22×10^{-9}	1.23×10^{-9}	9.70×10^{-10}	8.33×10^{-10}
Deniz ötrofikasyonu	9.32×10^{-10}	9.32×10^{-10}	8.32×10^{-10}	6.25×10^{-10}	8.99×10^{-10}	8.00×10^{-10}	9.22×10^{-10}	5.14×10^{-10}	4.41×10^{-10}
Su tüketimi, Su ekosistemleri	1.20×10^{-11}	1.20×10^{-11}	-1.79×10^{-9}	4.47×10^{-12}	1.15×10^{-11}	1.03×10^{-11}	1.49×10^{-10}	-1.66×10^{-9}	-1.42×10^{-9}
Kaynak Tüketimi (USD2013)									
Fosil kaynak kıtlığı	4.72×10^{3}	4.72×10^{3}	3.88×10^{3}	3.88×10^{3}	4.55×10^{3}	4.06×10^{3}	3.52×10^{3}	1.84×10^{3}	1.59×10^{3}
Maden kaynağı kıtlığı	1.15	1.15	1.48	7.80×10^{-1}	1.11	9.89×10^{-1}	1.15	1.11	9.50×10^{-1}

S2 ve S7 senaryolarında, enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması, her etki kategorisinde çevresel etkilerin azaltılmasına olumlu katkı sağlamaktadır. S8'de olduğu gibi kurutma işleminin %60 KM içeriğine kadar yapılması ile oluşan etkilerin azaldığı belirlenmesine rağmen yasal mevzuatlar göz önüne alındığında tercih edilebilir bir seçenek olarak görülmemektedir. Bantlı kurutucu teknolojisine ilişkin ekosistem kalitesi hasar kategorisindeki etki kategorilerinin dağılımı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Bantlı kurutucu ekosistem kalitesi hasar kategorisi değerlendirmesi

Bantlı kurutucu senaryolarının kaynak tüketimi hasar kategorisinde yer alan etki kategorileri değerlendirildiğinde, fosil kaynak kıtlığının ana çevresel etkiye sahip etki kategorisi olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.9).

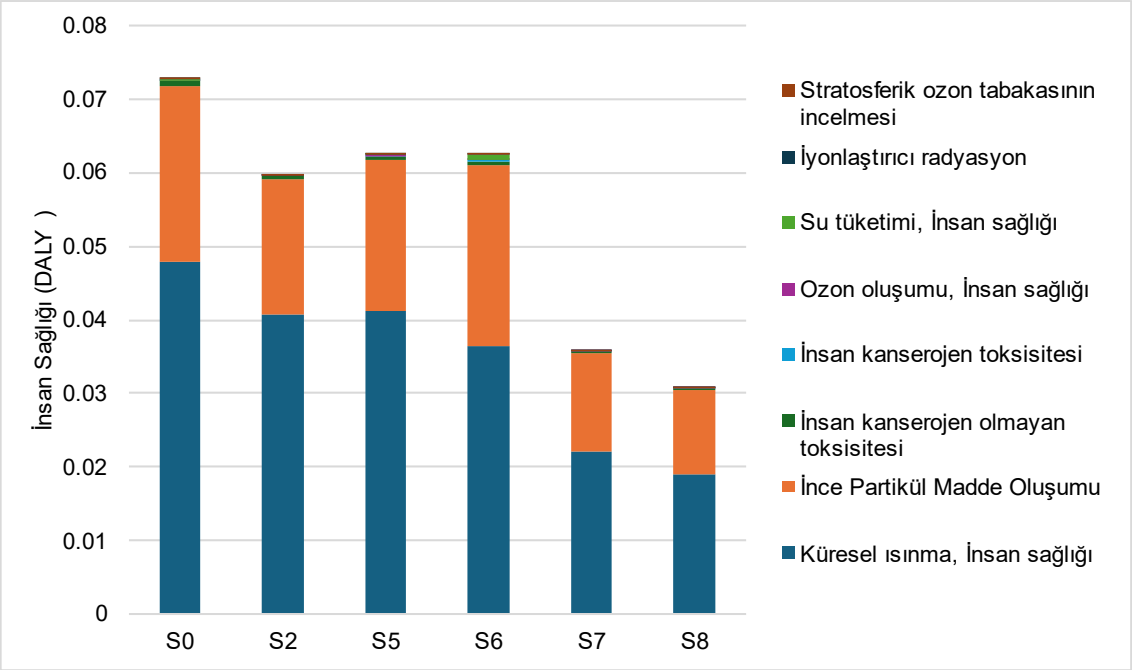


Şekil 4.9. Bantlı kurutucu kaynak tüketimi hasar kategorisi değerlendirmesi

İnsan sağlığı ve ekosistem kalitesi hasar kategorilerinde olduğu gibi, yenilenebilir enerji kaynaklarından ve atık yakılması ile elde edilen termal ısıdan enerji ihtiyacının karşılanması, kaynak tüketimi hasar kategorisinde çevresel etkilerin azaltılması için en tercih edilebilir senaryolar olarak yer almaktadır.

4.4.2. Döner Kurutucu senaryolarının etki kategorileri değerlendirmesi

Döner Kurutucu senaryoları ile elde edilen çevresel etkiler incelendiğinde bantlı kurutucudan farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Döner Kurutucu ile çamur kurutmanın çevresel etkilerini azaltmak için senaryoların uygulanması sonucunda hesaplanan etki kategorileri değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Döner kurutucu için uygulanan farklı senaryolarda, insan sağlığı hasar kategorisi etki kategorilerindeki değişimler Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Döner kurutucu insan sağlığı hasar kategorisi değerlendirmesi

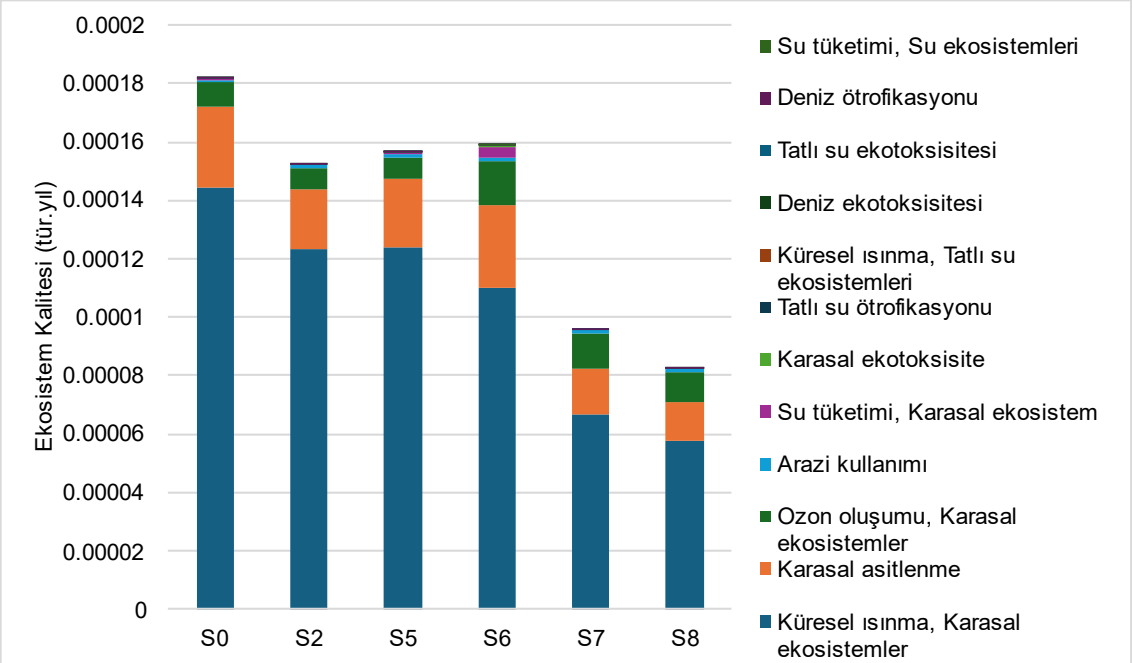
Elektrik ihtiyacının %50'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması (S2), enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından ve atıkların yakılmasından karşılanması (S7 ve S8) stratejileri, insan sağlığı ve ekosistem kalitesi hasar kategorilerinde, çevresel etkilerin azaltılması açısından en olumlu katkıyı sağlamıştır. Elektriğin %50'sinin fotovoltaik enerjiden karşılanması (S2) ince partikül madde oluşumunda en yüksek azalmayı sağlarken, elektriğin tamamen yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi (S7) ve (S8), insan sağlığı hasar kategorisindeki küresel ısınma potansiyeli ve ince partikül madde oluşumuna ilişkin çevresel etkilerin neredeyse yarı yarıya azalmasını sağlayarak, en yüksek olumlu katkıyı sağlayan senaryolar olmuştur.

.

Çizelge 4.9. Döner kurutucu senaryoları için yaşam döngüsü etki analizi sonuçları

Etki Kategorisi	Senaryolar								
	S0	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S6**	**S7**	**S8**
İnsan sağlığı (DALY)									
Küresel ısınma, İnsan sağlığı	4.79×10^{-2}	4.79×10^{-2}	4.08×10^{-2}	4.08×10^{-2}	4.62×10^{-2}	4.12×10^{-2}	3.64×10^{-2}	2.21×10^{-2}	1.90×10^{-2}
İnce Partikül Madde Oluşumu	2.39×10^{-2}	2.39×10^{-2}	1.83×10^{-2}	1.82×10^{-2}	2.31×10^{-2}	2.06×10^{-2}	2.47×10^{-2}	1.33×10^{-2}	1.15×10^{-2}
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi	5.95×10^{-4}	5.95×10^{-4}	4.58×10^{-4}	4.43×10^{-4}	5.74×10^{-4}	5.11×10^{-4}	4.67×10^{-4}	1.78×10^{-4}	1.53×10^{-4}
İnsan kanserojen toksisitesi	6.92×10^{-5}	6.92×10^{-5}	7.38×10^{-5}	5.70×10^{-5}	6.68×10^{-5}	5.94×10^{-5}	5.41×10^{-5}	4.65×10^{-5}	3.99×10^{-5}
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı	5.57×10^{-5}	5.26×10^{-5}	4.59×10^{-5}	4.58×10^{-5}	5.39×10^{-5}	4.86×10^{-5}	1.04×10^{-4}	8.43×10^{-5}	7.31×10^{-5}
Su tüketimi, İnsan sağlığı	2.48×10^{-5}	2.48×10^{-5}	-4.70×10^{-3}	5.13×10^{-6}	2.40×10^{-5}	2.13×10^{-5}	6.84×10^{-4}	-4.06×10^{-3}	-3.48×10^{-3}
İyonlaştırıcı radyasyon	9.26×10^{-6}	9.26×10^{-6}	6.88×10^{-6}	6.78×10^{-6}	8.93×10^{-6}	7.94×10^{-6}	8.90×10^{-6}	4.03×10^{-6}	3.46×10^{-6}
Stratosferik ozon tabakasının incelmesi	3.72×10^{-6}	3.72×10^{-6}	3.09×10^{-6}	3.07×10^{-6}	3.59×10^{-6}	3.19×10^{-6}	3.84×10^{-6}	2.56×10^{-6}	2.20×10^{-6}
Ekosistem kalitesi (tür.yıl)									
Küresel ısınma, Karasal ekosistemler	1.45×10^{-4}	1.45×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.40×10^{-4}	1.24×10^{-4}	1.10×10^{-4}	6.67×10^{-5}	5.74×10^{-5}
Karasal asitlenme	2.73×10^{-5}	2.73×10^{-5}	2.08×10^{-5}	2.08×10^{-5}	2.64×10^{-5}	2.35×10^{-5}	2.84×10^{-5}	1.53×10^{-5}	1.32×10^{-5}
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler	8.26×10^{-6}	7.54×10^{-6}	6.85×10^{-6}	6.84×10^{-6}	8.00×10^{-6}	7.24×10^{-6}	1.51×10^{-5}	1.23×10^{-5}	1.07×10^{-5}
Arazi kullanımı	1.15×10^{-6}	1.15×10^{-6}	1.16×10^{-6}	1.07×10^{-6}	1.15×10^{-6}	1.12×10^{-6}	1.10×10^{-6}	1.03×10^{-6}	1.01×10^{-6}
Su tüketimi, Karasal ekosistem	1.51×10^{-7}	1.51×10^{-7}	-2.86×10^{-5}	3.12×10^{-8}	1.46×10^{-7}	1.29×10^{-7}	4.16×10^{-6}	-2.47×10^{-5}	-2.11×10^{-5}
Karasal ekotoksisite	1.81×10^{-7}	1.81×10^{-7}	1.57×10^{-7}	1.34×10^{-7}	1.74×10^{-7}	1.55×10^{-7}	1.41×10^{-7}	7.14×10^{-8}	6.13×10^{-8}
Tatlı su ötrofikasyonu	6.72×10^{-8}	6.72×10^{-8}	5.97×10^{-8}	4.99×10^{-8}	6.48×10^{-8}	5.76×10^{-8}	5.24×10^{-8}	2.77×10^{-8}	2.38×10^{-8}
Küresel ısınma, Tatlı su ekosistemleri	3.95×10^{-9}	3.95×10^{-9}	3.36×10^{-9}	3.36×10^{-9}	3.81×10^{-9}	3.39×10^{-9}	3.00×10^{-9}	1.82×10^{-9}	1.57×10^{-9}
Deniz ekotoksisitesi	1.47×10^{-9}	1.47×10^{-9}	1.28×10^{-9}	1.13×10^{-9}	1.42×10^{-9}	1.26×10^{-9}	1.17×10^{-9}	6.51×10^{-10}	5.64×10^{-10}
Tatlı su ekotoksisitesi	1.35×10^{-9}	1.35×10^{-9}	1.47×10^{-9}	1.05×10^{-9}	1.31×10^{-9}	1.16×10^{-9}	1.11×10^{-9}	9.22×10^{-10}	7.92×10^{-10}
Deniz ötrofikasyonu	8.54×10^{-10}	8.54×10^{-10}	7.82×10^{-10}	6.34×10^{-10}	8.24×10^{-10}	7.32×10^{-10}	8.40×10^{-10}	5.49×10^{-10}	4.71×10^{-10}
Su tüketimi, Su ekosistemleri	6.76×10^{-12}	6.76×10^{-12}	-1.28×10^{-9}	1.39×10^{-12}	6.52×10^{-12}	5.79×10^{-12}	1.86×10^{-10}	-1.10×10^{-9}	-9.46×10^{-10}
Kaynak Tüketimi (USD2013)									
Fosil kaynak kıtlığı	5.17×10^{3}	5.17×10^{3}	4.58×10^{3}	4.57×10^{3}	4.99×10^{3}	4.44×10^{3}	3.61×10^{3}	2.41×10^{3}	2.07×10^{3}
Maden kaynağı kıtlığı	1.06	1.06	1.30	7.98×10^{-1}	1.03	9.13×10^{-1}	1.06	1.03	8.84×10^{-1}

Elektriğin %50'sinin fotovoltaik enerjiden karşılanması (S2), ekosistem kalitesi hasar kategorisinde de oluşan etkilerin azalmasına sebep olmuştur (Şekil 4.11). Özellikle karasal ekotoksisite ve karasal asitlenme kategorilerinde ortaya çıkan etkilerde, en yüksek azalmanın gerçekleştiği belirlenmiştir.



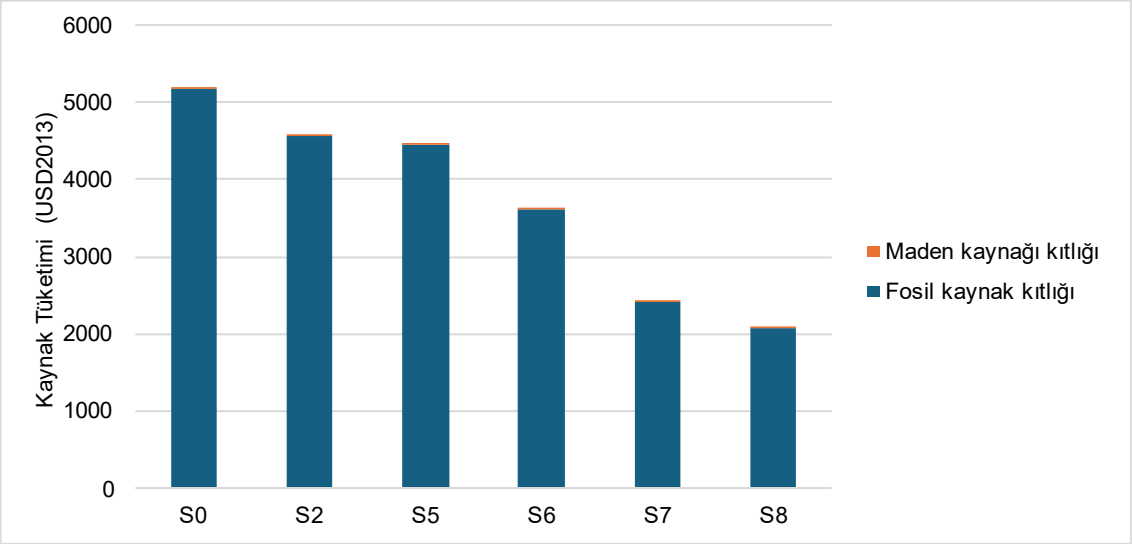
Şekil 4.11. Döner kurutucu ekosistem kalitesi hasar kategorisi değerlendirmesi

İnsan sağlığı hasar kategorilerine benzer şekilde küresel ısınma açısından en yüksek azalma, elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı senaryolarda (S2, S7, S8) elde edilmiştir. Özellikle, elektriğin %50'sinin fotovoltaik enerjiden (S2) karşılanması, ekosistem kalite hasarı kategorisinde karasal asitlenme ve ozon oluşumu kategorilerinde en fazla düşüşe neden olmuştur. Oluşturulan senaryolar ile ekosistem kalitesi hasar kategorisindeki çevresel etkilerin azalması sağlanmakla birlikte, bazı senaryolar farklı etki kategorilerinde artışa sebep olmaktadır. Termal enerjinin %50'sinin evsel atıkların yakılmasından karşılanması senaryosunda (S6) küresel ısınma potansiyeli etkisi azalırken; karasal asitlenme, ozon oluşumu (karasal ekosistemler), su tüketimi ve karasal ekotoksisite kategorilerindeki çevresel etkiler artmaktadır.

Kaynak tüketimi hasar kategorisine ilişkin etki kategorileri Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Döner kurutucu için oluşturulan senaryolarda; kaynak tüketimi hasar kategorisi alt etki kategorilerindeki değişim tamamen fosil kaynak tüketimine bağlı olarak gerçekleşmektedir. İnsan sağlığı ve ekosistem kalitesi hasar kategorilerinde olduğu gibi, S7 ve S8 stratejileri, fosil kaynak tüketimine bağlı oluşan çevresel etkilerin azaltılmasına en olumlu katkıyı sağlayan senaryolar olarak belirlenmiştir.

Döner kurutucu senaryoları hasar kategorileri değerleri, bantlı kurutucu senaryoları hasar kategorileri değerleri ile karşılaştırıldığında (Çizelge 4.8 ve Çizelge

4.9), uygulanan senaryoların bantlı kurutucuların çevresel etkilerin azaltılmakta daha fazla katkı sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Döner kurutucu kaynak tüketimi hasar kategorisi değerlendirmesi

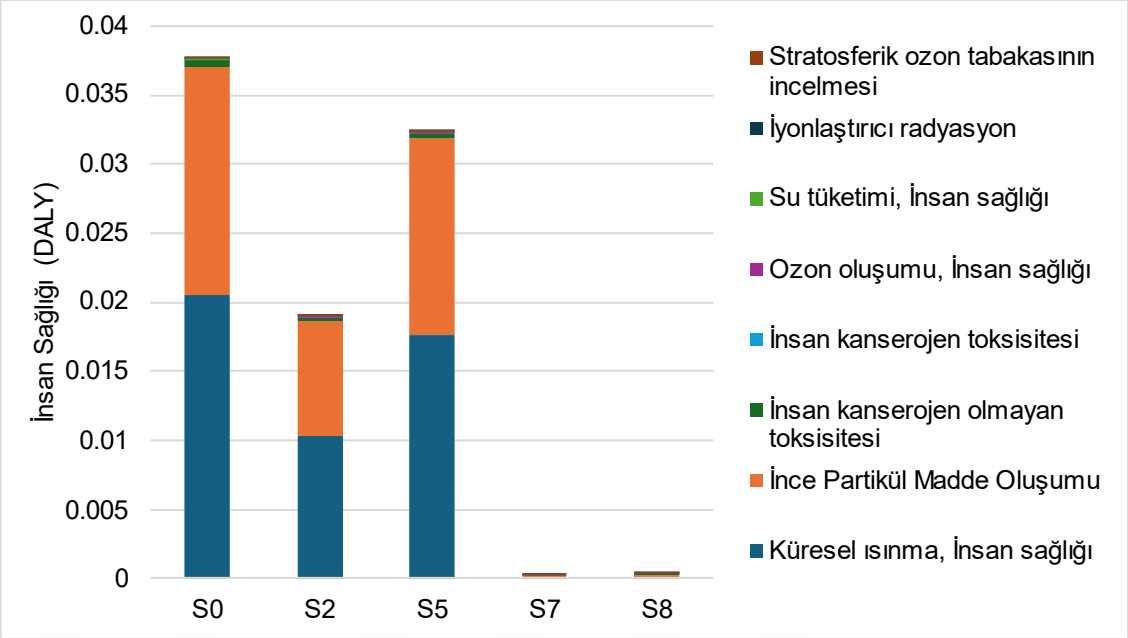
4.4.3. Solar Kurutucu senaryolarının etki kategorileri değerlendirmesi

Solar kurutma teknolojisi için farklı senaryolarda insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi hasar kategorilerinin etki kategorileri için hesaplanan değerler Çizelge 4.10'da verilmiştir. Solar kurutma teknolojisinde, ısı enerjisi kullanılmadığı için S6 değerlendirilmemiştir. Solar kurutma teknolojisinde insan sağlığı hasar kategorisinde ana etki kategorileri; küresel ısınma potansiyeli ve ince partikül madde oluşumuna olarak belirlenmiştir (Şekil 4.13). Enerji ihtiyacının %50'sinin fotovoltaik enerjiden karşılandığı (S2) senaryoda, etki kategorilerine bağlı oluşan çevresel etkiler, yaklaşık %50 azalmaktadır. Enerji ihtiyacının atıkların yakılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı (S7 ve S8) senaryolarda ise çevresel etkilerin daha fazla azalması sağlanabilmektedir.

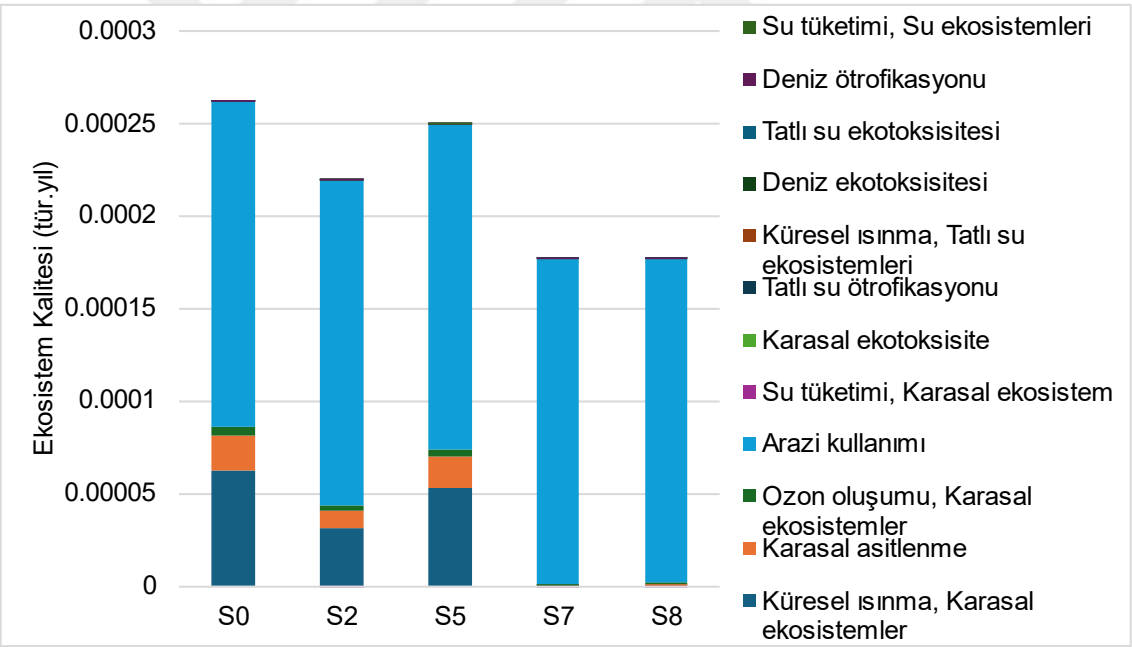
Ekosistem kalitesi hasar kategorisine ilişkin elde edilen sonuçlar, Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Solar kurutma senaryolarında, alan kullanımına bağlı çevresel etkiler ön plana çıkmaktadır. Enerji ihtiyacının tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmadığı senaryolarda (S0, S2, S5); küresel ısınma potansiyeli, karasal asitlenme ve ozon oluşumu kategorilerine ilişkin çevresel etkiler söz konusudur. Enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması senaryolarında (S2, S7 ve S8) ise; ekosistem kalitesi hasar kategorisi alt etki kategorileri azalmakla birlikte, alan kullanımına bağlı olarak oluşan çevresel etkiler azalmamaktadır. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği solar kurutma ile küresel ısınma potansiyeli etki kategorisine bağlı oluşan çevresel etkiler büyük ölçüde azaltılabilirken, alan kullanımı etki kategorisine bağlı oluşan çevresel etkilerin azaltılmasının mümkün olmadığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda; alan kullanımına bağlı çevresel etkilerin, solar kurutma için bir dezavantaj olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.10. Solar kurutucu senaryoları için yaşam döngüsü etki analizi sonuçları

Etki Kategorisi	Senaryolar							
	S0	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S7**	**S8**
İnsan sağlığı (DALY)								
Küresel ısınma, İnsan sağlığı	2.06×10^{-2}	2.05×10^{-2}	1.03×10^{-2}	1.03×10^{-2}	1.98×10^{-2}	1.77×10^{-2}	7.65×10^{-5}	1.67×10^{-4}
İnce Partikül Madde Oluşumu	1.65×10^{-2}	1.64×10^{-2}	8.33×10^{-3}	8.30×10^{-3}	1.59×10^{-2}	1.42×10^{-2}	1.24×10^{-4}	1.31×10^{-4}
İnsan kanserojen olmayan toksisitesi	4.37×10^{-4}	4.37×10^{-4}	2.41×10^{-4}	2.19×10^{-4}	4.22×10^{-4}	3.75×10^{-4}	2.28×10^{-5}	1.99×10^{-5}
İnsan kanserojen toksisitesi	3.54×10^{-5}	3.54×10^{-5}	4.20×10^{-5}	1.78×10^{-5}	3.41×10^{-5}	3.04×10^{-5}	2.44×10^{-5}	2.09×10^{-5}
Ozon oluşumu, İnsan sağlığı	3.16×10^{-5}	2.84×10^{-5}	1.75×10^{-5}	1.74×10^{-5}	3.06×10^{-5}	2.79×10^{-5}	3.28×10^{-6}	3.69×10^{-6}
Su tüketimi, İnsan sağlığı	5.65×10^{-5}	5.65×10^{-5}	-6.72×10^{-3}	2.82×10^{-5}	5.45×10^{-5}	4.84×10^{-5}	-6.75×10^{-3}	-5.78×10^{-3}
İyonlaştırıcı radyasyon	7.15×10^{-6}	7.15×10^{-6}	3.73×10^{-6}	3.58×10^{-6}	6.89×10^{-6}	6.13×10^{-6}	1.60×10^{-7}	1.41×10^{-7}
Stratosferik ozon tabakasının incelmesi	1.87×10^{-6}	1.87×10^{-6}	9.65×10^{-7}	9.42×10^{-7}	1.80×10^{-6}	1.61×10^{-6}	3.74×10^{-8}	3.65×10^{-8}
Ekosistem kalitesi (tür.yıl)								
Küresel ısınma, Karasal ekosistemler	6.20×10^{-5}	6.19×10^{-5}	3.11×10^{-5}	3.11×10^{-5}	5.98×10^{-5}	5.33×10^{-5}	2.31×10^{-7}	3.94×10^{-7}
Karasal asitlenme	1.90×10^{-5}	1.88×10^{-5}	9.64×10^{-6}	9.62×10^{-6}	1.84×10^{-5}	1.64×10^{-5}	2.40×10^{-7}	2.82×10^{-7}
Ozon oluşumu, Karasal ekosistemler	4.77×10^{-6}	4.06×10^{-6}	2.76×10^{-6}	2.75×10^{-6}	4.64×10^{-6}	4.25×10^{-6}	7.37×10^{-7}	7.94×10^{-7}
Arazi kullanımı	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-4}
Su tüketimi, Karasal ekosistem	3.44×10^{-7}	3.44×10^{-7}	-4.09×10^{-5}	1.72×10^{-7}	3.31×10^{-7}	2.94×10^{-7}	-4.10×10^{-5}	-3.52×10^{-5}
Karasal ekotoksisite	1.34×10^{-7}	1.34×10^{-7}	9.98×10^{-8}	6.75×10^{-8}	1.29×10^{-7}	1.15×10^{-7}	3.36×10^{-8}	2.89×10^{-8}
Tatlı su ötrofikasyonu	4.94×10^{-8}	4.94×10^{-8}	3.87×10^{-8}	2.47×10^{-8}	4.77×10^{-8}	4.24×10^{-8}	1.40×10^{-8}	1.20×10^{-8}
Küresel ısınma, Tatlı su ekosistemleri	1.69×10^{-9}	1.69×10^{-9}	8.51×10^{-10}	8.50×10^{-10}	1.63×10^{-9}	1.46×10^{-9}	6.31×10^{-12}	1.08×10^{-11}
Deniz ekotoksisitesi	9.74×10^{-10}	9.74×10^{-10}	7.07×10^{-10}	4.90×10^{-10}	9.41×10^{-10}	8.41×10^{-10}	2.23×10^{-10}	1.97×10^{-10}
Tatlı su ekotoksisitesi	8.66×10^{-10}	8.66×10^{-10}	1.03×10^{-9}	4.36×10^{-10}	8.36×10^{-10}	7.44×10^{-10}	5.98×10^{-10}	5.14×10^{-10}
Deniz ötrofikasyonu	6.31×10^{-10}	6.31×10^{-10}	5.28×10^{-10}	3.15×10^{-10}	6.08×10^{-10}	5.41×10^{-10}	2.13×10^{-10}	1.83×10^{-10}
Su tüketimi, Su ekosistemleri	1.54×10^{-11}	1.54×10^{-11}	-1.83×10^{-9}	7.68×10^{-12}	1.48×10^{-11}	1.32×10^{-11}	-1.84×10^{-9}	-1.57×10^{-9}
Kaynak Tüketimi (USD2013)								
Fosil kaynak kıtlığı	1.73×10^{3}	1.73×10^{3}	8.68×10^{2}	8.65×10^{2}	1.67×10^{3}	1.49×10^{3}	5.82	1.35×10^{1}
Maden kaynağı kıtlığı	7.66×10^{-1}	7.66×10^{-1}	1.11	3.84×10^{-1}	7.39×10^{-1}	6.57×10^{-1}	7.23×10^{-1}	6.21×10^{-1}



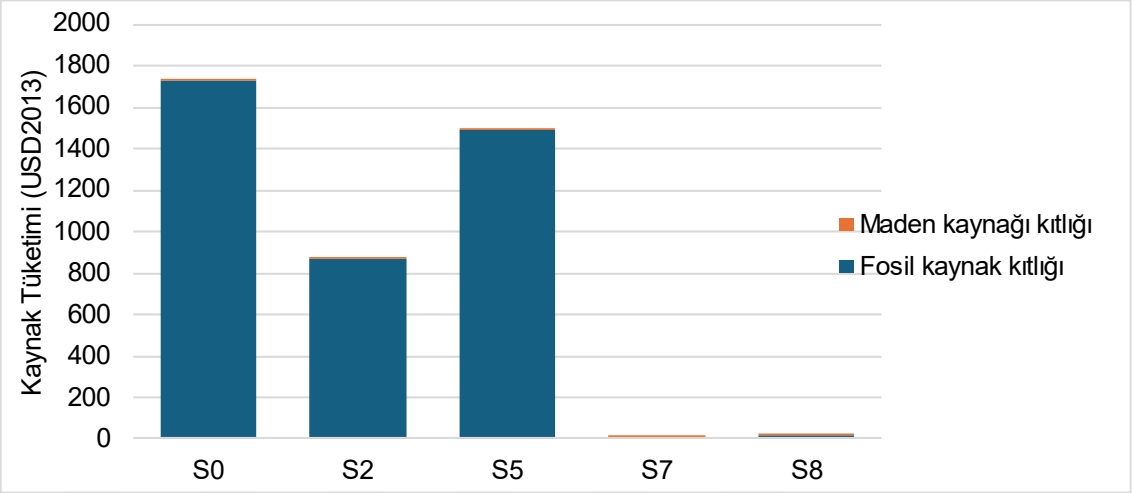
Şekil 4.13. Solar kurutucu insan sağlığı hasar kategorisi değerlendirmesi



Şekil 4.14. Solar kurutucu ekosistem kalitesi hasar kategorisi değerlendirmesi

KM içeriğinin %60 olacak şekilde kurutma uygulanan senaryoda (S5) nihai bertaraf sahasına taşınması gereken çamur hacmi arttığı için çamur taşınması ile ilgili çevresel etkilerin artmaktadır. Bu nedenle, S5'de küresel ısınma potansiyeli ve karasal asitlenme kategorilerinde oluşan çevresel etkilerin arttığı belirlenmiştir. Ana senaryo (S0) ile karşılaştırıldığında, %60 KM içeriğine kadar kurutma, ekosistem kalitesi hasar kategorisinde oluşan çevresel etkilerin azaltılmasına en az katkı sağlayan senaryo olmuştur.

Kaynak tüketimi hasar kategorisine bağlı çevresel etkiler, Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Diğer kurutma teknolojilerinde olduğu gibi; kaynak tüketimi hasar kategorisinde oluşan çevresel etkilerin neredeyse tamamı, fosil kaynak tüketiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.15. Solar kurutucu kaynak tüketimi hasar kategorisi değerlendirmesi

Enerji ihtiyacının tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlandığı senaryolarda (S7 ve S8), fosil kaynak tüketiminin neredeyse sıfıra yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak S7 ve S8'de maden kaynağı tüketiminde bir miktar artış olduğu gözlenmiştir. Bu durum S7 ve S8'de tek enerji kaynağı olarak kullanılan fotovoltaik enerjinin uygulanması için gerekli güneş hücrelerinin üretimi sırasında maden kaynaklarının tüketiminden kaynaklanmaktadır.

4.5. Çamur Kurutma Senaryolarının Küresel Isınma Potansiyeline Etkileri

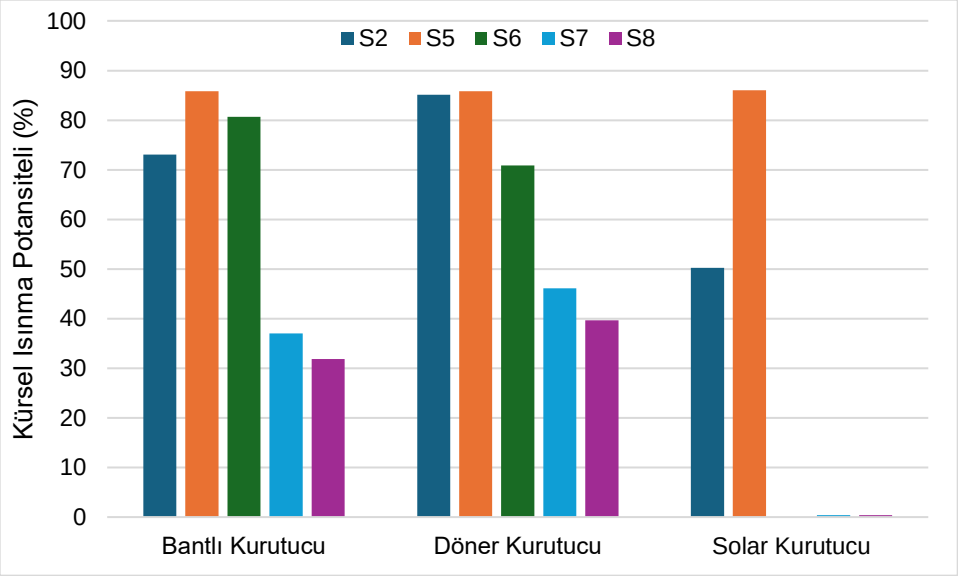
S2, S5, S6, S7 ve S8 senaryolarında önerilen stratejiler uygulanarak ReCiPe orta noktası (H) ile küresel ısınma potansiyellerindeki değişimler hesaplanmıştır. Fonksiyonel birim olarak 1 ton KM tercih edilmiş olup, hesaplamalar belirlenen fonksiyonel birime göre gerçekleştirilmiştir. Farklı senaryolarla elde edilen küresel ısınma potansiyelleri Çizelge 4.11'de ve Şekil 4.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.11. Farklı senaryolarla elde edilen küresel ısınma potansiyelleri

Kurutma Teknolojileri	**Küresel Isınma Potansiyeli (kg CO2e/ton KM)**					
	S0	**S2**	**S5**	**S6**	**S7**	**S8**
Bantlı Kurutucu	328.6712	240.1306	282.1846	265.2284172	121.714	104.792
Döner Kurutucu	344.3618	293.139	295.6337	244.0469122	158.888	136.656
Solar Kurutucu	147.6377	74.1403	127.0129	-	0.54956	0.58206

Solar kurutma teknolojisinde, ısı enerjisi kullanılmadığından S6 değerlendirilmemiştir. Elektriğin %50'sinin fotovoltaik enerjiden sağlanmasını içeren senaryo (S2), bantlı kurutucunun küresel ısınma potansiyelinde %27'lik bir azalma

sağlarken, ısı enerjisinin %50'sinin atık yakmadan elde edilmesi döner kurutucudan kaynaklanan küresel ısınma potansiyelinin azaltılması açısından daha faydalı olmuştur.



Şekil 4.16. Çamur kurutma senaryoları ile küresel ısınma potansiyelinde elde edilen azalma oranları

Küresel ısınma potansiyeli açısından gerçekleştirilen değerlendirmeye göre, küresel ısınma potansiyeli değeri ve ana senaryoya göre (S0) küresel ısınma potansiyelinde elde edilen azalma oranları incelendiğinde en iyi sonuçlar solar kurutucuya S7 ve S8 senaryolarının uygulanması ile elde edilmiştir. Yenilenebilir kaynakların tek elektrik kaynağı olarak kullanılmasıyla solar kurutucu ile küresel ısınma potansiyelinin neredeyse sıfıra yakın bir değere indirilebileceği gözlemlenmiştir. Solar kurutucunun ardından bantlı kurutucu küresel ısınma potansiyeli en düşük ikinci kurutma yöntemi olmuştur. İlginçtir ki, arıtma çamuru nihai kuru madde içeriğinin %60'a düşürülmesi elektrik ve termal enerji tüketiminde azalmaya yol açsa da bu strateji diğer stratejiler kadar etkili olmamıştır.

5. SONUÇLAR

Günümüzde, iklim değişikliği konusunda gerçekleştirilecek çalışmaların önemi gittikçe artmakta olup, yenilenebilir enerji kaynaklarının arıtma süreçlerine eklenmesine ilişkin çalışmaların artacağı kaçınılmaz bir gerçek olarak karşımıza çıkmaktadır. Hem Türkiye'de hem de Avrupa Birliği'nde giderek daha sıkı hale gelen yasal düzenlemeler nedeniyle, arıtma çamurlarından faydalanmaya yönelik termal kurutma yöntemlerinin uygulanması daha popüler bir yöntem haline gelmektedir.

Dört farklı kurutucu (bantlı kurutucu, akışkan yataklı kurutucu, döner kurutucu, solar kurutucu) kullanılarak oluşturulan sekiz farklı senaryoda, alternatif çamur işleme yöntemlerinin çevresel etkilerini karşılaştırmak amacıyla kapıdan kapıya yaklaşımı kullanılarak, yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, OpenLCA 1.10 yazılımı; ELCD veri tabanı yardımıyla oluşturulan senaryoların, kategorize edilmiş çevresel etkilerini değerlendirmek için orta nokta ve son nokta göstergeli ReCiPe 2016 hiyerarşi yöntemi kullanılmıştır. Çamur kurutma teknolojilerinin farklı senaryolardaki çevresel etkileri, insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynak tüketimi hasar kategorileri açısından karşılaştırılmıştır.

Bantlı, akışkan yataklı, döner ve solar kurutma teknolojilerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi sonucunda, insan sağlığı hasar kategorisi ve kaynak tüketimi hasar kategorisi açısından solar kurutmanın; ekosistem kalitesi hasar kategorisi açısından ise bantlı kurutmanın en az çevresel etkiye sahip kurutma teknolojisi olduğu belirlenmiştir. Solar kurutma ve bantlı kurutucu yöntemlerinin dahil olduğu senaryolarda elde edilen küresel ısınma potansiyelleri karşılaştırıldığında, bantlı kurutucular neredeyse iki katı çevresel etkiye sebep olmaktadır. Elektrik ihtiyacı için; yenilenebilir enerji kaynakları ve atıkların yakılmasından elde edilen buharın kullanılması, bantlı ve döner kurutucuların küresel ısınma potansiyeli etkilerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu tür yenilenebilir kaynakların kullanılmasıyla birlikte, bantlı kurutucu ve döner kurutucu yöntemlerinde elde edilen küresel ısınma potansiyeli ve çevresel etkiler, solar kurutma ile elde edilen seviyelere kadar azaltılabilmektedir. Diğer yandan, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile, solar kurutmanın küresel ısınma potansiyeli sıfıra yakınlaştırılabilse de, arazi kullanımı nedeniyle ekosistem kalitesi üzerinde oluşan etkilerin azaltması mümkün değildir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar ve mevzuatlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, bantlı kurutucu teknolojisi ile oluşturulan senaryoların (S7 ve S8) insan sağlığına, ekosistem kalitesine ve kaynak tüketimine daha az zarar verdiği belirlenmiştir. Oluşturulan senaryolarda, termal kurutma işleminde tüketilen enerji ve elektriğin, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması, çevresel etkilerin azaltılması açısından en etkili çözüm olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ile, gerçek ölçekli uygulamalarda çamur kurutma işlemlerinin daha düşük çevresel etkilere sahip olacak şekilde planlanması için karar vericilere yardımcı olması hedeflenmektedir.

6. KAYNAKLAR

Abuşoğlu, A., Özahi, E., Kutlar, A.I., Al-jaf, H. 2017. Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production. *J. Clean. Prod.* 14: 1684-1692.

Alanya, S., Dewulf, J., Duran, M. 2015. Comparison of overall resource consumption of biosolids management system processes using exergetic life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol.,* 49: 9996-10006.

Alyanak, İ. 2010. Arıtma Çamurlarının Bertarafı ve Ön İşlem Örnekleri. 2. Ulusal Katı Atık Yönetim Kongresi. ss. 9-20, 18-20 Ekim, Mersin.

Alyaseri, I., Zhou, J. 2017. Towards better environmental performance of wastewater sludge treatment using son nokta approach in LCA methodology. *Heliyon,* 3 (3): 1-24.

Andreoli, C.V., Von Sperling, M., Fernandes, F. 2007. Sludge Treatment and Disposal. IWA Publishing: 6, London, 241 p.

Anonim 1: https://www.redco.com.tr [Son erişim tarihi: 17.03.2024].

Anonim 2: https://www.andritz.com/group-en [Son erişim tarihi: 17.03.2024].

Bare, J.C., Hofstetter, P., Pennington, D.W., Udo de Haes, H.A. 2000. Life cycle impact assessment workshop summary midpoints versus son noktas: the sacrifices and benefits. *Int. J. Life Cycle Assess*., 5 (6): 319-326.

Baumann, H., Tillman, A.M. 2004. The Hitch Hiker's guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application. Studentlitteratur. Lund, 543 p.

Blanco, D., Collado, S., Laca, A., Díaz, M. 2016. Life cycle assessment of introducing an aerobic digester in municipal wastewater treatment plant in spaing. *Water Sci. Tech,* 73 (4): 835-842.

Bravo, L., Ferrer, I. 2011. Life cycle assessment of an intensive sewage treatment plant in Barcelona (Spain) with focus on energy aspects. *Water Sci. Tech.,* 64 (2): 440-447.

Buonocore, E., Mellino, S., De Angelis, G., Liu, G., Ulgiati, S. 2016. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecol. Indic.,* 94: 13-23.

Cartmell, E., Gostelow, P., Riddell-Black, D., Simms, N., Oakey, J., Morris, J., Jeffrey, P., Howsam, P., Pollard, S.J. 2006. Biosolids-a fuel or a waste an integrated appraisal of five co-combustion scenarios with policy analysis. *Environ. Sci. Technol.,* 40 (3): 649-658.

Chen, Y-C., Kuo, J. 2016. Potential of greenhouse gas emissions from sewage sludge management: a case study of Taiwan. *J. Clean. Prod.,* 129: 196-201.

Cleverson, V.A., Sperling, M.V., Fernandez, F. 2007. Sludge Treatment And Disposal. Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing: 6, London, 258 p.

Corominas, L., Foley, J., Guest, J.S., Hospido, A., Larsen, H. F., Morera, S., Shaw, A. 2013. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. *Water Res*., 47: 5480-5492.

Crites, R., Tchobanoglous G. 1998. Small and Decentralized Wastewater Management Systems, McGraw-Hill, New York.

ÇOB, 2006. Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği. Çevre ve Orman Bakanlığı, 8 Ocak 2006 tarihli ve 26047 sayılı Resmî Gazete.

ÇOB, 2010. Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik. Çevre ve Orman Bakanlığı, 3 Ağustos 2010 tarihli ve 27661 Sayılı Resmî Gazete.

ÇŞB, 2010. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 26 Mart 2010 tarihli ve 27533 Sayılı Resmî Gazete.

ÇŞB, 2014. Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 20 Haziran 2014 tarih ve 29036 Sayılı Resmî Gazete.

ÇŞB, 2015. Atık Yönetimi Yönetmeliği. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 02.04.2015 tarihli ve 29314 sayılı Resmî Gazete.

ÇŞİB, 2022. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 31 Aralık 2004 tarihli ve 25687 Sayılı Resmî Gazete. Değişiklik: 17 Aralık 2022 tarihli ve 32046 sayılı Resmî Gazete.

Davis L. M. 2010. Water and Wastewater Engineering: Design Principals and Practice. McGraw-Hill International Editions, Boston, Massachusets, chapter 20.

Dekker E, Zijp MC, van de Kamp M.E., Temme E. HM., van Zelm R. 2020. A taste of the new ReCiPe for life cycle assessment: Consequences of the updated impact assessment method on food product LCAs. *Int. J. Life Cycle Assess.,* 25 (12): 2315–2324.

Del Borghi, A., Gaggero, P. L., Gallo, M. & Strazza, C. 2008. Development of pcr for wwtp based on a case study. *Int. J. Life Cycle Assess.,* 13: 512–521.

Demirer, G. 2011. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ve Uygulama Örnekleri Çevre Alanında Kapasite Geliştirme Projesi Entegre Ürün Politikaları ve Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi Bölgesel Çevre Merkezi, REC Türkiye REW, İstanbul, 40 s.

Deng, W.Y., Yan, J.H., Li, X.D., Wang, F., Zhu, X.W., Lu, S.Y., Cen, K.F. 2009. Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process. *J. Hazard. Mater.,* 162: 186–192.

Deviatkin, I., Havukainen, J., Horttanainen, M. 2017. Possibilities for enhanced nitrogen recovery from digestate through thermal drying. J. Mater. *Cycles Waste Manag.,* 2: 1–10.

Dinçer, İ., Zamfirescu, C. 2015. Drying Phenomena: Theory and Applications. John Wiley & Sons, Ltd., Canada, 497 p.

Ding, W., Li, L., Liu, J. 2015. Investigation of the effects of temperature and sludge characteristics on odors and VOC emissions during the drying process of sewage sludge. *Water Sci. Technol*, 72 (4): 543–552.

Ding, A., Zhang, R., Ngo, H.H., He, X., Ma, J., Nan, J., Li, G. 2021. Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review. *Sci. Total Environ*., 769: 144451.

Dong, J., Chi, Y., Tang, Y., Wang, F., Huang, Q. 2014. Combined life cycle environmental and exergetic assessment of four typical sewage sludge treatment techniques in china. *Energy & Fuels*, 28: 2114-2122.

EC 2008. Waste Framework Directive EC/2008/98 (Avrupa Birliği Atık Çerçeve Direktifi).

Ekinci, M.Ş. 2019. Atıksu arıtma çamurlarının bertarafında solar kurutma sisteminin kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 55 s.

Filibeli, A. 2009. Arıtma Çamurlarının İşlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları: 6, İzmir, 255 s.

Filibeli, A., Ayol, A., Büyükkamacı, N., Saygılı, G., Şener, G. 2018. Investigation of Beneficial Usage Alternatives of Domestic/Municipal/Industrial Treatment Plant Sludges: Case Study of Gediz Watershed Area in Turkey. 4. International Conference on Sustainable Development, 11-15 Nisan, Atina, Yunanistan.

Filibeli, A., Ayol, A., Büyükkamacı, N. 2022. Arıtma çamurlarının yönetimi ve maliyeti: gediz havzası arıtma çamuru yönetimi projesi. *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23 (1): 79–90.

Frankl, P., Menichetti, E., Raugei, M., Lombardelli, S., Prennushi. G. 2005. Final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications. Deliverable no. 11.2-RS Ia of the NEEDS (NewEnergy Externalities Developments for Sustainability) project, Rome, Italy.

Gallego, A., Hospido, A., Moreira, M.T., Feijoo, G. 2008. Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. *Resour. Conserv. Recy.*, 52: 931–940.

Goedkoop, M.J., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R., 2009. ReCiPe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the son nokta level. In: First edition Report I: Characterisation. RIVM, C., Pre Consultants, Radboud University Nijmegen. VROM, Den Haag, Netherlands, 126 p.

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A.M., Struijs, J., Van Zelm, R. 2013. ReCiPe 2008: a life cycle ımpact assessment method which comprises harmonised category ındicators at the midpoint and the son nokta level. report ı: characterisation, first edition (version 1.08). Pre Consultants, University of Lieden, Radboud University Nijmegen. RIVM, C., Netherlands, 130 p.

Gomez-Rico, M.F., Fullana, A., Font R. 2008. Volatile organic compounds released from thermal drying of sewage sludge. Water Pollution IX. Southampton, UK: WIT Press, 111, pp. 425–433.

Gourdet, C., Girault, R., Berthault, S., Richard, M., Tosoni, J. 2017. In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: a life cycle assessment approach. *J. Clean. Prod.*, 143: 1123-1136.

GreenDelta Software. 2019. https://www.greendelta.com/software/ [Son Erişim Tarihi: 25.05.2024].

Guinée, J.B. 2002. Handbook on life cycle assessment. operational guide to the ıso standards. *Int. J. Life Cycle Assess.,* 7: 311-313.

Guinée, J. B, Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T. 2011. Life cycle assessment: past, present, and future. *Environ. Sci. Technol.*, 45 (1): 90–96.

Hong, J., Hong, J., Otaki, M., Jolliet, O. 2009. Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management*, 29 (2): 696–703.

Horttanainen, M., Deviatkin, I., Havukainen, J. 2017. Nitrogen release from mechanically dewatered sewage sludge during thermal drying and potential for recovery. *J. Clean. Prod*., 142: 1819-1826.

Hospido, A., Moreira, M.T., Fernández-Couto, M., Feijoo, G. 2004. Environmental performance of a municipal wastewater treatment plant. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 9 (4): 261-271.

Hospido, A., Moreira, M.T., Martín, M., Rigola, M., Feijoo, G. 2005. Environmental evaluation of different treatment processes for sludge from urban wastewater treatment: anaerobic digestion versus thermal processes. *Int. J. Life Cycle Assess.,* 10 (5): 336-345.

Hospido, A., Moreira, M.T., Feijoo, G. 2008. A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in galicia. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 13 (1): 57–64.

Houillon G., Jolliet O. 2005. Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis. *J. Clean. Prod.*, 13: 287–299.

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., Van Zelm, R. 2017. ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and son nokta level. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 22 (2): 138-147.

IPCC 2019. Chapter 5 Waste, in: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.

ISO 2006. ISO 14040 Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. International Standards Organisation, Geneva. https://www.iso.org/standard/37456.html [Son Erişim tarihi: 25.05.2024].

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J.P., Rebitzer, G., Rosenbaum, R. K. 2003. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *Int. J. Life Cycle Assess., 8*: 324-330.

KAMAG, 2013. Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi Projesi, Final Raporu (TÜBİTAK-108G167). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

Kasakura, T., Imoto, Y., Mori, T. 1993. Overvıew and system analysıs of varıous sewage sludge dryıng processes. *Drying Technology: An Int., J.,* 11 (5): 871-900.

Lassaux, S., Renzoni, R., Germain, A. 2007. Life cycle assessment of water from the pumping station to the wastewater treatment plant. *Int. J. Life Cycle Assess.,* 12 (2): 118-126.

Lei, Z., Dezhen, C., Jinlong, X. 2009. Sewage Sludge Solar Drying Practise And Characteristics Study. In Proceedings of the 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 1-5 p., Wuhan, China.

Liew, C.S., Mong, G.R., Lim, J.W., Raksasat, R., Rawindran, H., Leong, W.H., Manogaran, D., Chai, Y.H., Ho, Y.C., Rahmah, A.U., Lin, C., Khoo, K.S., Kiatkittipong, W. 2023. Optimizing biodiesel production from waste with computational chemistry, machine learning and policy insights: a review. *Waste Manag.,* 164: 238–249.

Liu, B., Wei, Q., Zhang, B., Bi, J. 2013. Life cycle ghg emissions of sewage sludge treatment and disposal options in tai lake watershed. *Sci. Total Environ.,* 4 (47): 361-369.

Lundin, M., Olofsson, M., Pettersson, G. J., Zetterlund, H. 2004. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resour., Conserv. Recycl.,* 41: 255-278.

Mayer, F., Bhandari, R., Gäth S.A. 2021. Life cycle assessment of prospective sewage sludge treatment paths in Germany. *J. Environ., Manage.,* 290: 1-13.

McNamara, G., Fitzsimons, L., Horrigan, M., Phelan, T., Delaure, Y., Corcoran, B., Doherty E., Clifford, E. 2016. Life cycle assessment of wastewater treatment plants in ıreland. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.,* 4 (3): 216-233.

Mills, N., Pearce, P., Farrow, J., Thorpe, R.B., Kirkby, N. F. 2014. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste Management,* 34: 185-195.

Nieuwlaar, E. 2013. Life cycle assessment and energy systems. Module Earth Syst. Environ. Sci., 1-8.

O'Shaughnessy, S.A., Song, I., Artiola, J.F., Choi, C.Y. 2008. Nitrogen loss during solar drying of biosolids. *Environ. Technol.,* 29(1): 55-65.

Öztürk, İ., Timur, H., Koşkan, U. 2005. Atıksu Arıtımının Esasları: Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü. Çevre ve Orman Bakanlığı Yayınları. Ankara, 467 s.

Pasqualino, J.C., Meneses, M., Abella, M., Castells, F. 2009. LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant. *Environ. Sci. Technol.,* 43 (9): 3300-3307.

Patel, K., Singh S.K. 2022. A life cycle approach to environmental assessment of wastewater and sludge treatment processes, *Water Environ. J.,* 36 (3): 412–424.

Peregrina, C.A., Lecomte, D., Arlabosse, P., Rudolph, V. 2006. Life cycle assessment (lca) applied to the design of an innovative drying process for sewage sludge. *Process Saf. Environ. Prot.,* 84 (4): 270–279.

Piao, W., Kim, Y., Kim, H., Kim, M., Kim, C. 2016. Life cycle assessment and economic efficiency analysis of integrated management of wastewater treatment plants. *J. Clean. Prod.*, 113 (1): 325-337.

Rebitzer, G., Ekvallb, T., Frischknecht, R., Hunkelerd, D., Norris, G., Rydbergf, T., Schmidtg, W. P., Suhh, S. B., Weidemai, P. D., Penningtonf, W. 2004. Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ. Int.,* 30: 701-720.

Rehl, T., Müller, J. 2011. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. *Resour., Conserv. Recycl.,* 56: 92-104.

Rengin, S. 2017. Arıtma çamurunun kurutulmasının termodinamik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 87 s.

Righi, S., Oliviero, L., Pedrini, M., Buscaroli, A. 2013. Life cycle assessment of management systems for sewage sludge and food waste: centralized and decentralized approaches. *J. Clean. Prod.,* 44: 8-17.

Sablayrolles, C., Gabrielle, B., Montrejaud-Vignoles, M. 2010. Life cycle assessment of biosolids land application and evaluation of the factors impacting human toxicity through plant uptake. *J. Ind. Ecol.,* 14 (2): 231-241.

Salihoğlu, N.K., Pınarlı V. 2007. Atıksu arıtma çamurlarının kapalı yataklarda güneş enerjisiyle kurutulması. *Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi*, 17(1): 3-14.

Salihoğlu, N.K., Orakçı, B. 2016. Türkiye'de arıtma çamurlarının güneş enerjisiyle kurutulması için yaklaşımlar ve ekonomik değerlendirme. *Çevre Bilim ve Teknoloji Teknik Dergi*, 1(1): 126- 133.

Sapmaz, S. 2022. Arıtma çamurlarının bertarafında kullanılan kurutma sistemlerinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi. Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 134 s.

Sayılgan, E., Ünlü, H.I. 2021. Evsel arıtma çamurunun kapalı solar kurutulmasında mevsim faktörünün değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33 (1): 251-261.

Silva, A.P.M., Barros, R.M., Lora, E.E.S., Flórez, C.A.D., dos Santos, I.F.S., Crispim, M.C., Renó, M.L.G. 2023. Characterization and evaluation of the life cycle of energy use from drying bed sludge. *Energy*, 263: 125630.

Singh, R.P., Agrawal, M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Manage.,* 28: 347-358.

Stefaniak, J., Zelazna, A., Pawlowski, A. 2014. Environmental assessment of different dewatering and drying methods on the basis of life cycle assessment. *Water Sci. Technol.,* 69 (4): 783-788.

Suh, Y.J., Rousseaux P. 2002. An lca of alternative wastewater sludge treatment scenarios. *Resour. Conserv. Recycl.,* 35: 191-200.

TBMM. 1982. Çevre Kanunu. 9 Ağustos 1982 tarihli ve 18132 sayılı Resmî Gazete.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3rd Edition, Metcalf & Eddy, Inc., Pennsylvania, USA: McGraw Hill.

Tchobanoglous, G., Burton, FL., Stensel, H.D. 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, Fourth Edition. Meltcalf & Eddy, Inc., New York, USA: McGraw-Hill.

Tillman, A., Svingby, M., Lundstrom, H. 1998. Life cycle assessment of municipal waste water systems. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 3 (3): 145-157.

Turovskiy I.S., Mathai P.K. 2006. Wastewater Sludge Processing. Wiley Interscience. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

TÜBİTAK-KAMAG 108G167 Nolu Proje. Evsel/Kentsel Arıtma Çamurlarının Yönetimi, İTÜ, DEÜ, ODTÜ, BÜ, 2010-2013.

Uggetti, E., Llorens, E., Pedescoll, A., Ferrer, I., Castellnou, R., García, J. 2009. Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: characterization of three full-scale systems in catalonia. *Bioresour. Technol.*, 100: 3882-3890.

USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2006. Life Cycle Assessment: Principles and Practice, National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, 80 p.

Van't Land, C.M. 2011. Drying In The Process Industry. In Drying In The Process Industry. A John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 381 p.

Yang, X., Mu, H., Zhao, H., Xue, Z., Li, N. 2020. Environmental Impact And Economic Benefit Evaluation Of Sewage Sludge Treatment Technologies. IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science, 446, 032-078.

Yapıcıoğlu, P., Demir, Ö. 2017. Çamur arıtımının yaşam döngüsü değerlendirmesi – genel bakış. *Harran Üniversitesi Müh. Dergisi,* 2: 78-92.

Yıldırım, M. 2015. Atıksu arıtma sisteminin seçiminde karar destek sistemleri ve hayat boyu değerlendirme yaklaşımının kullanılması. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 195 s.

Yoshida, H., Christensen, T.H., Scheutz, C. 2013. Life cycle assessment of sewage sludge management: a review. *Waste Manag. Res.*, 31 (11): 1083-1101.

Yoshida, H., Clavreul, J., Christensen, T.H., Scheutz, C. 2014. Influence of data collection schemes on the Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant. *Water Res.*, 56: 292-303.

Yoshida, H., Hoeve, M., Christensen, T., Bruun, S., Jensen, L. S., Scheutz, C. 2018. Life cycle assessment of sewage sludge management options including long-term impacts after land application. *J. Clean. Prod.*, 174: 538-547.

ÖZGEÇMİŞ

Onur ERKAYA

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2021-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2016-2021	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

2023- Devam Ediyor	Arüv Çevre A.Ş. Antalya	Çevre Mühendisi