



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE ARITMA ÇAMURLARI VE
BERTARAF UYGULAMALARI: NİKSAR BELEDİYESİ
ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yeşim ÖGÜD

DANIŞMAN

Doç. Dr. Emine BAŞTÜRK

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222301710 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Yeşim ÖGÜD tarafından hazırlanan “ **ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE ARITMA ÇAMURLARI VE BERTARAF UYGULAMALARI: NİKSAR BELEDİYESİ ÖRNEĞİ** ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Emine BAŞTÜRK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Doç. Dr. İsmail ŞİMŞEK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 12/06/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

YEŞİM ÖGÜD

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle her aşamada bana rehberlik eden, akademik katkılarının yanı sıra anlayışı ve desteğiyle yanımda olan danışmanım Sayın Doç. Dr. Emine BAŞTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Tez sürecinde bana moral veren, iş yükümü paylaşarak destek olan ve yapıcı katkılarda bulunan Elektrik- Elektronik Mühendisi Rasim Berk YILMAZ ve eşi Nilşah YILMAZ, Gıda Yüksek Mühendisi Elif ÖZSOY ve tüm iş arkadaşlarıma teşekkür ederim. Saha çalışmaları ve veri temini sürecinde sağladıkları destek nedeniyle Niksar Belediyesi'ne ve ilgili birim çalışanlarına da ayrıca teşekkür ederim. Hayatım boyunca her koşulda yanımda olan, sabırları, sevgileri ve sonsuz destekleriyle bana güç veren aileme minnettarlığımı ifade etmek isterim. Ayrıca bu zorlu süreçte pes etmeden emek veren, çaba gösteren, sabreden ve kendini geliştirmekten vazgeçmeyen kendime de teşekkür ediyorum.

YEŞİM ÖGÜD
AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	7
2.1 Arıtma Çamuru.....	7
2.1.1 Arıtma çamurunun özellikleri	7
2.1.2 Arıtma çamurunun sınıflandırılması	10
2.2 Arıtma Çamuru Bertaraf Yöntemleri	12
2.2.1 Toprakta kullanım.....	12
2.2.2 Enerji geri kazanımı (yakma – termal bertaraf)	14
2.2.3 Anaerobik çürütme (biyogaz üretimi).....	16
2.2.4 Düzenli depolama ile bertaraf	17
2.2.5 İnşaat malzemesi üretimi (yeniden kullanım)	17
2.2.6 Kompostlama	18
2.3 Arıtma Çamuru İle İlgili Türkiye’deki ve Dünyadaki Durum	20
2.3.1 Türkiye’deki durum	20
2.2 AB Mevzuatı	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
3.1 Tesis Bilgileri	35
3.1.1 Niksar atık su arıtma tesisi işletme bilgileri.....	35
3.1.2 Evsel nitelikli atık suların arıtılması faaliyeti	35
3.1.3 Vaziyet planları, iş akım şemaları ve proses özetleri.....	37
3.2 Niksar Arıtma Tesis Arıtma Çamur Potansiyeli ve Karakteristiği	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	57
4.1 Arıtma Çamuru Analizleri Ve Karakterizasyonu.....	57
4.1.1 Toprakta kullanım için yapılan arıtma çamuru analizleri	57
4.1.2 Atık yönetimi yönetmeliği ek 3/b kapsamında yapılan analizler.....	59
4.1.3 Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik ek-2’ye göre yapılan analizler	64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ.....	81

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE ARITMA ÇAMURLARI VE BERTARAF UYGULAMALARI: NİKSAR BELEDİYESİ ÖRNEĞİ

Yeşim ÖGÜD

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Emine BAŞTÜRK

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Tokat ili Niksar ilçesindeki Niksar Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisi'nden elde edilen stabilize arıtma çamurunun teknik ve çevresel uygunluğunu belirlemek, güvenli bertaraf veya geri kazanım seçeneklerini değerlendirmektir. Stabilize arıtma çamuru numunesi üzerinde yapılan analizlerde ağır metaller (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Hg), organik kirleticiler (PAH, PCB, PCDD/F), pH, nem, kuru madde, organik madde, azot, fosfor ve E. coli gibi parametreler "Toprakta Kullanım Amaçlı Arıtma Çamurlarının Kontrolü Yönetmeliği" (2010) kapsamında incelenmiştir. Sonuçlar, çamurun ağır metaller ve organik kirleticiler açısından çevresel risk taşımadığını; yalnızca E. coli seviyesinin 2 log10 EMS/g sınırın biraz üzerinde olduğunu ve ek stabilizasyon gerektiğini göstermiştir.

Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek-3/B'ye göre yapılan değerlendirmelerde stabilize çamurun fizikokimyasal özellikleri ve ağır metal düzeylerinin tehlikesiz atık (II. sınıf) sınırlarının altında olduğu, inert sınıfa ise girmediği belirlenmiştir. Toksikite testlerinde balık biyodeneyi (ZSF=8) toksik etki göstermemiş, Daphnia magna testinde ise %100, %50 ve %25 eluat konsantrasyonlarında tüm bireylerde inhibisyon (hareketsizlik) gözlemlendiğinden toksik etki oluşmuş olup; buna karşın %12,5 ve altı seyreltilmiş çözeltilerde ise tüm bireylerin hareketli kaldığından toksik etki oluşmamıştır. Ayrıca, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik çerçevesinde çamurun II. sınıf atık olarak düzenli depolanabileceği veya alternatif geri kazanım süreçleriyle değerlendirilebileceği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, stabilize arıtma çamurunun çevre ve insan sağlığı açısından güvenli bir şekilde yönetilebileceği ve sürdürülebilir, çevre dostu bertaraf veya geri kazanım seçeneklerine entegre edilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: : Arıtma Çamuru, Atık Su Arıtma Tesisi, Bertaraf Yöntemleri, Sürdürülebilirlik, Çevre Yönetimi.

Mayıs, 2025; 82 sayfa

MASTER'S THESIS

WASTEWATER TREATMENT PLANTS AND DISPOSAL APPLICATIONS: NİKSAR MUNICIPALITY EXAMPLE

Yeşim ÖGÜD

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Emine BAŞTÜRK

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the technical and environmental suitability of the stabilized sewage sludge obtained from the Niksar Wastewater Treatment Plant in the Niksar district of Tokat province, and to evaluate safe disposal or recovery options. Analyses conducted on the stabilized sludge sample included parameters such as heavy metals (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Hg), organic pollutants (PAH, PCB, PCDD/F), pH, moisture content, dry matter, organic matter, nitrogen, phosphorus, and E. coli, in accordance with the “Regulation on the Control of Sewage Sludge for Use on Soil” (2010). The results showed that the sludge does not pose an environmental risk in terms of heavy metals and organic pollutants, although the E. coli level was slightly above the permissible limit, indicating the need for additional stabilization.

According to the evaluation carried out in line with Annex 3/B of the Waste Management Regulation, the physicochemical properties and heavy metal levels of the stabilized sludge were found to be below the limits for non-hazardous waste (Class II), although it did not qualify as inert waste. In toxicity tests, the fish bioassay (ZSF = 8) showed no toxic effect, while in the Daphnia magna test, toxic effects were observed at 100%, 50%, and 25% eluat concentrations, as all individuals were inhibited (immobile); however, at 12.5% and lower diluted solutions, no toxic effect was detected since all individuals remained mobile. Furthermore, within the framework of the Regulation on Landfilling of Waste, it was determined that the sludge could be disposed of in a Class II landfill or evaluated through alternative recovery processes. In conclusion, it has been determined that stabilized sewage sludge can be safely managed in terms of environmental and human health, and it can be integrated into sustainable and environmentally friendly disposal or recovery options.

In conclusion, it has been determined that stabilized sewage sludge can be managed in a manner that is safe for both the environment and human health, and can be incorporated into sustainable and eco-friendly disposal or recovery practices.”

Key Words: Sewage Sludge, Wastewater Treatment Plant, Disposal Methods, Sustainability, Environmental Management.

May, 2025; 82 page

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Genel yerleşim planı.....	36
Şekil 3.2. Vaziyet planı.....	37



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Arıtma çamurunun fiziksel özellikleri	8
Çizelge 2.2. Arıtma çamurunun kimyasal özellikleri	9
Çizelge 2.3. Arıtma çamurunun biyolojik özellikleri	10
Çizelge 2.4. Bertaraf yöntemlerinin karşılaştırılması	19
Çizelge 2.5. Ek I-A Topraktaki ağır metal sınır değerleri	21
Çizelge.2.6. Ek 1-B Toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek maksimum ağır metal konsantrasyonları.	21
Çizelge 2.7. Ek I-C Toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurundaki organik bileşiklerin konsantrasyonlarının ve dioksinlerin sınır değerleri.	22
Çizelge 3.1. Solar kurutuma hesapları	50
Çizelge 3.2. Yıllık güneş radyasyonu miktarları.	51
Çizelge 3.3. Çamur işlenecek üniteler.	52
Çizelge 3.4. Tesiste ortaya çıkacak arıtma çamuru miktarı ve projeksiyonu	53
Çizelge 4.1. Stabilize arıtma çamuru solar çıkış analiz sonuçları.....	58
Çizelge 4.2. Arıtma çamurunun fizikokimyasal özellikleri	60
Çizelge 4.3. İnorganik içerik analizleri.....	61
Çizelge 4.4. Ağır metal değerlerinin değerlendirilmesi.....	61
Çizelge 4.5. Kullanılan toksisite testleri ve yorumları.....	62
Çizelge 4.6. Daphnia magna akut toksisite test sonuçları.....	63
Çizelge 4.7. Arıtma çamuruna ait toksisite test sonuçları.....	63
Çizelge 4.8. Arıtma çamurundaki ağır metallerin ADDY ek-2 sınır değerleriyle karşılaştırılması	65
Çizelge 4.9. Arıtma çamurunun nihai kullanım ve bertaraf seçenekleri değerlendirme tablosu	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
AAT	Atık su Arıtma Tesisi
ADDY	Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
AKM	Askıda Katı Madde
AOX	Absorblan Organik Halojenler
A2O	Anaerobik-Anoksik-Oksik Biyolojik Arıtma Süreci
As	Arsenik
ATV-A	Alman Atık Su Teknolojileri Derneği Standartları
Cd	Kadmiyum
CH₄	Metan
CO₂	Karbondiyoksit
Cr	Krom
Cu	Bakır
DEHP	Di(2-etilheksil) ftalat
DO	Çözünmüş Oksijen
E. coli	Escherichia coli
E.N.	Eşdeğer Nüfus
EC/1013/2006	Atıkların Sınır Ötesi Taşınımı Direktifi
EMS	En Büyük Sayım Birimi (mikrobiyolojik analiz)
EPA	ABD Çevre Koruma Ajansı
EU	Avrupa Birliği (European Union)
Fe	Demir
Hg	Cıva
H₂O	Su
ICP-MES	Inductively Coupled Plasma – Mass Emission Spectrometry
IPCC	Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli
KM	Kuru Madde
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LAS	Lineer Alkilbenzen Sülfonatlar
MLSS	Karışık Sıvı Süspansiyonu
Mn	Mangan
Na	Sodyum
NaOH	Sodyum Hidroksit (Kostik Soda)
N	Azot
Ni	Nikel
NO₃⁻	Nitrat
NPE	Nonilfenol Etiloksilatlar
PAH	Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar

PAO	Fosfat Akümüle Eden Organizmalar
Pb	Kurşun
PCB	Poliklorlu Bifeniller
PCDD/F	Poliklorlubenzeno-p-dioksinler ve furanlar
P	Fosfor
pH	Asidik/Bazik Ortam Derecesi
RAS	Geri Devir Aktif Çamur (Return Activated Sludge)
PLC	Programlanabilir Lojik Kontrol Ünitesi
SAİS	Sürekli Atık su İzleme Sistemi
SKKY	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
SCADA	Veri İzleme ve Kontrol Sistemi
SO₄²⁻	Sülfat
TEQ/kg	Toksik Eşdeğer (ng TEQ/kg)
TKN	Toplam Kjeldahl Azotu
TSS	Toplam Katı Madde
TS EN	Türk Standardı - Avrupa Normu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UV	Ultraviyole Dezenfeksiyon Sistemi
Zn	Çinko
86/278/EEC	Arıtma Çamuru Direktifi
91/271/EEC	Kentsel Atık Su Arıtma Direktifi
1999/31/EC	Düzenli Depolama Direktifi
2000/60/EC	Su Çerçeve Direktifi
2008/98/EC	Atık Çerçeve Direktifi
2010/75/EU	Endüstriyel Emisyonlar Direktifi

1. GİRİŞ

Sanayileşme, teknolojik ve endüstriyel gelişmelerin yanı sıra hızla artan nüfus, kentleşme, bireylerin yaşam tarzlarındaki değişim ve kontrolsüz tüketim alışkanlıkları; evsel ve endüstriyel kaynaklı atık su miktarında ciddi artışlara yol açmıştır. Bu durum, hem çevre hem de insan sağlığı açısından önemli sorunları beraberinde getirmiştir. Artan atık miktarı, doğal kaynakların hızla tükenmesine, iklim değişikliğine ve çevresel dengenin bozulmasına neden olmakta; özellikle su kaynakları üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır (Özyazıcı ve Özyazıcı, 2012).

Günümüzde artan nüfus, kentleşme ve endüstriyel faaliyetlerin yoğunlaşması, atık su miktarlarında önemli bir artışa neden olmakta ve bu durum, etkin atık su arıtma sistemlerinin kurulmasını ve işletilmesini zorunlu kılmaktadır. Ülkemizde atık su arıtma konusunda, geçmiş yıllara nazaran daha düzenli faaliyetler yürütülmektedir. Bugüne kadar hayata geçirilen birçok proje seçilen yöntem, maliyetler, iklim şartları, işletim problemleri gibi birçok sebep ile uygulama esnasında problemlere yol açmakta idi. Gelişen teknoloji ile birlikte son teknoloji modern tesisler, uygulamaya alınan projeler daha başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır (Kaya, 2012).

Atık suların çevreye zarar vermeden bertaraf amacıyla kurulan atık su arıtma tesisleri, su kalitesinin korunması açısından kritik bir rol oynamaktadır (Topaç ve Uçaroğlu, 2020). Ancak bu tesislerde gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemler sonucunda ortaya çıkan arıtma çamurları, hem çevresel hem de yönetsel açıdan ciddi bir sorun oluşturmaktadır (Akdemir, 2020).

Sayıları her geçen gün artan atık su arıtma tesislerine paralel olarak da arıtma çamurlarının miktarı da hızla artmaktadır. Türkiye’de oluşan arıtma çamurlarının yaklaşık %14’ü belediyelere ait alanlarda bertaraf edilmekte, %27’si yakma yöntemiyle uzaklaştırılmakta, %42’si tarımsal arazilere uygulanmakta ve %17’si ise çeşitli sanayi sektörlerinde yeniden değerlendirilmektedir (Topaç ve Uçaroğlu, 2020).

Atık su arıtma tesislerinde gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemler sonucunda, arıtma sürecinden arta kalan ve genellikle çöken ya da su yüzeyinde biriken katı maddeler “arıtma çamuru” olarak adlandırılır (Angın, 2016). Bu

tesislerde, atık sudaki çözülmüş ya da askıda bulunan maddelerin uzaklaştırılması ile oluşan çamur, tesisin işlevi açısından kaçınılmaz bir yan üründür (Ayvaz, 2002).

Arıtma çamuru; genellikle sıvı ya da yarı katı kıvamda, kendine has kötü bir kokuya sahip olup, uygulanan arıtma yöntemine bağlı olarak %0,25 ile %12 arasında değişen oranlarda katı madde içermektedir (Uzun ve Bilgili, 2011). İçeriğinde yüksek oranda organik madde bulunmasının yanı sıra, toksik bileşenler, patojenler ve ağır metaller gibi çevresel risk oluşturan unsurlar da yer alabilmektedir. Bu nedenle arıtma çamurunun doğru şekilde yönetilmesi çevre ve halk sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır.

Arıtma çamurlarının miktarı, tesisin kapasitesine, kullanılan proseslere ve atık suyun karakteristiğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Türkiye'de belediyelere ve organize sanayi bölgelerine ait arıtma tesislerinin sayısı son yıllarda artmış; bu da paralel olarak arıtma çamuru üretim miktarlarında önemli bir yükselişe yol açmıştır. Ancak elde edilen çamurun bertarafı, hâlen büyük ölçüde çevresel açıdan sürdürülebilir olmayan yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Özellikle düzenli depolama ve araziye serme gibi uygulamalar, sınırlı alan kullanımı ve uzun vadeli çevresel etkiler nedeniyle eleştirilmekte; bu durum alternatif bertaraf ve değerlendirme yöntemlerinin önemini artırmaktadır.

Atık su arıtma tesislerinde uygulanan arıtma süreçleri sonucunda oluşan arıtma çamurları, arıtma sürecinin doğal ve kaçınılmaz bir yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır (Ersoy ve Özbay, 2023). Ancak bu çamurların nihai olarak nasıl yönetileceği ve bertaraf edileceği, çevre mühendisliği alanında uzun süredir tartışılan karmaşık bir problemdir. Türkiye'de her yıl artan miktarda arıtma çamuru üretilmesine rağmen bu atıkların büyük bir kısmı hâlâ düzenli depolama, geçici arazi uygulamaları veya doğal kurutma gibi sürdürülebilirliği tartışmalı yöntemlerle bertaraf edilmektedir. Bu durum, hem çevresel açıdan risk oluşturmakta hem de çamurun içerdiği potansiyel enerji ve besin değerlerinin değerlendirilmesini engellemektedir.

Atık su arıtma tesislerinde karşılaşılan en önemli çevresel ve teknik sorunlardan biri, arıtma çamurlarının yönetimidir. Kentsel nüfusun artışı ve şehirleşmenin hız kazanmasıyla birlikte, atık su arıtımından kaynaklanan çamurların işlenmesi ve

bertarafı giderek daha karmaşık ve maliyetli bir hale gelmiştir (Özbek, 2022). Arıtma çamurlarının yüksek su içeriği nedeniyle hacimlerinin büyük olması, bu çamurların depolanması, taşınması ve nihai bertarafı konusunda önemli zorluklar yaratmaktadır. Bu doğrultuda, arıtma çamurlarının yalnızca güvenli bertarafı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik katkı sağlayacak biçimde değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Ayrıca Türkiye'deki pek çok arıtma tesisinde çamur işleme ünitelerinin yetersiz olması, bertaraf maliyetlerinin yüksekliği ve mevzuat uygulamalarındaki eksiklikler, bu sorunun daha da büyümesine neden olmaktadır. Çamurun taşıma, susuzlaştırma ve nihai bertaraf süreçlerindeki teknik ve ekonomik zorluklar da dikkate alındığında, bu problemin yalnızca bir atık yönetimi sorunu değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik boyutları olan stratejik bir mesele olduğu görülmektedir.

Arıtma çamurlarının yönetiminde temel amaç, bu atığın çevreye zarar vermeden en ekonomik ve sürdürülebilir şekilde bertaraf edilmesini ya da mümkünse yeniden değerlendirilmesini sağlamaktır. Bu kapsamda, çamur susuzlaştırma, stabilizasyon, kurutma, yakma ve enerji geri kazanımı gibi çeşitli teknolojiler ve yöntemler kullanılmaktadır. Ayrıca çamurun tarımda kullanım potansiyeli de, içerdiği organik madde ve besin elementleri nedeniyle değerlendirilmekte; ancak bu tür uygulamalar, ağır metal ve patojen içeriklerine yönelik sınırlandırmalar nedeniyle dikkatli bir denetim süreci gerektirmektedir.

Su ve atık su yönetimi, artan nüfus, sanayileşme ve iklim değişikliği gibi faktörler doğrultusunda günümüzde çevre mühendisliği disiplininin en kritik çalışma alanlarından biri haline gelmiştir. Özellikle atık su arıtma tesislerinden elde edilen arıtma çamuru, çevresel açıdan potansiyel risk taşıyan ancak aynı zamanda önemli miktarda organik madde ve enerji içeriğine sahip olan bir yan üründür (Ertemiz, 2015).

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, kentleşmenin artmasıyla birlikte atık su arıtımından kaynaklanan çamurların yönetimi, çevre politikalarının önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu çamurların uygun şekilde işlenmesi, bertaraf edilmesi ya da yeniden kullanımı, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de halk sağlığı açısından kritik öneme sahiptir (Ünlü, 2020).

Türkiye’de atık su arıtma tesislerinin sayısı son yıllarda önemli ölçüde artmış, bu artışa paralel olarak arıtma çamuru miktarında da ciddi bir yükseliş gözlemlenmiştir. TÜİK 2022 verilerine göre yalnızca belediyelere ait atık su arıtma tesislerinde yılda yaklaşık 348 bin ton (kuru madde bazında) çamur oluşmaktadır (URL-1). Ancak bu çamurun büyük bir kısmı hâlâ düzenli depolama veya geçici bekletme yoluyla bertaraf edilmekte, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir yöntemlerle değerlendirilme oranı oldukça düşüktür.

Arıtma çamurunun enerji geri kazanımı amacıyla değerlendirilmesi, atık yönetimi bağlamında etkili bir alternatif sunmanın yanı sıra, döngüsel ekonomi ilkeleri ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda önemli faydalar sağlamaktadır. Bu kapsamda özellikle anaerobik çürütme teknolojileri öne çıkmakta; bu yöntemle arıtma çamurundan biyogaz (çoğunlukla metan) üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Elde edilen biyogaz, elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülerek arıtma tesislerinin enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılmakta, böylece fosil yakıt tüketimi azaltılmaktadır. Aynı zamanda bu süreç, çamur hacmini azaltarak bertaraf maliyetlerini düşürmekte ve çevresel riskleri minimize etmektedir.

Türkiye’de arıtma çamurunun tarımda kullanımı, Atık Yönetimi Yönetmeliği ve Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılması Hakkında Yönetmelik kapsamında düzenlenmekte; ancak ağır metal, patojen ve kirletici konsantrasyonlarına yönelik sınır değerler sebebiyle çoğu zaman bu kullanım kısıtlanmaktadır. Bu durum, enerji geri kazanımı uygulamalarını daha cazip ve uygulanabilir kılmaktadır.

Arıtma çamurlarının nihai bertarafı, çevresel, iklimsel, uygulanabilirlik ve ekonomik kriterlerin yanı sıra, çamurun özellikleri de göz önünde bulundurularak çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir. Atık su arıtma tesislerinden elde edilen çamurlar, içeriklerine bağlı olarak uygulanabilirlik açısından farklı özelliklere sahip ürünlerdir (İrdemez, 2016). Ancak evsel nitelikli arıtma çamurlarında çok sayıda ve farklı özelliklere sahip zararlı organizmalar bulunabileceğinden, bu çamurların doğrudan araziye dökülmesi ciddi çevresel riskler taşımaktadır. Endüstriyel atık ağırlıklı arıtma çamurları ise, bünyelerinde barındırdıkları ağır metaller, tuzlar ve toksik maddeler gibi kirletici unsurlar nedeniyle, doğrudan araziye bertaraf edilmesi halinde, hem yeraltı suyu hem de toprak kirliliği gibi tehlikeli sonuçlara yol açabilir. Çünkü bu

etkenler hem yeraltı suyunu hem de toprağın kirlenmesine neden olacaktır (Aydın, 2004).

Atık su arıtma tesislerinde oluşan çamur, katı kirleticiler, ağır metaller, patojen mikroorganizmalar ve organik maddelerden oluşan karmaşık bir bileşime sahiptir. Bu çamur, yüksek kalorifik değeri nedeniyle potansiyel bir katı yakıt olarak değerlendirilebildiği gibi, içerdiği mikro elementler sayesinde tarımsal gübre olarak da kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Ancak, her iki kullanım alanı için de çamurun belirli çevresel ve sağlıkla ilgili standartları karşılaması gerekmektedir (Sapmaz, 2021).

Arıtma çamuru yönetimi seçenekleri uygun maliyetli, pratik ve uygulanabilir çözümler elde etme bakış açısıyla değerlendirilmelidir. Farklı yönetim senaryolarının avantajları ve dezavantajları, alternatifleri karşılaştırılarak değerlendirilmelidir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, Tokat İli Niksar İlçe'sinde faaliyet gösteren atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının mevcut bertaraf yöntemlerini analiz etmek ve sürdürülebilir, çevre dostu, teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir alternatifleri değerlendirmektir. Arıtma çamurlarının yönetimi yalnızca bir bertaraf meselesi değil, aynı zamanda enerji geri kazanımı, toprak iyileştirme ve döngüsel ekonomi açısından stratejik bir kaynak değerlendirme konusu olarak ele alınmaktadır.

Bu bağlamda çalışma kapsamında;

- Niksar atık su arıtma tesisinde oluşan arıtma çamurlarının miktarı, özellikleri ve çamur işleme süreçleri incelenmiş olup,
- Mevcut bertaraf yöntemleri (düzenli depolama, arazi uygulamaları, kompostlama, yakma, vb.) teknik, ekonomik ve çevresel açılardan karşılaştırılıp,
- Gelişmiş ülkelerde uygulanan yenilikçi bertaraf ve değerlendirme teknolojileri literatür taraması yoluyla ele alınıp,
- Türkiye'de mevcut mevzuat çerçevesinde arıtma çamurlarının yönetiminde karşılaşılan zorluklar ve iyileştirme olanakları değerlendirilmiştir.

Tez, saha verileri ve istatistiksel kaynaklar ışığında, Niksar Atık su arıtma tesisi sürdürülebilir arıtma çamuru yönetimi için uygulanabilir öneriler sunmayı

hedeflemiştir. Bu doğrultuda çalışma, yalnızca teknik çözüm önerileriyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda çevresel risklerin azaltılması ve kaynakların etkin ve sürdürülebilir kullanımı açısından da önemli bir değerlendirme aracı sunmuştur.

Bu tez çalışmasında, atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının özellikleri, işleme süreçleri ve Türkiye’de uygulanan bertaraf yöntemleri incelenecek; aynı zamanda sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik açıdan uygulanabilir bertaraf alternatifleri literatür ve saha verileri ışığında değerlendirilmiştir. Amaç, Niksar atık su arıtma tesisinde oluşan arıtma çamurlarının yönetimine yönelik mevcut durumu analiz etmek ve geleceğe dönük iyileştirme önerileri sunmaktır.



2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Arıtma Çamuru

2.1.1 Arıtma çamurunun özellikleri

Dünya genelinde hızla artan nüfus, beraberinde kentsel yayılım, tüketim alışkanlıklarında değişim ve sanayileşme gibi olguları getirmekte; bu durum ise atık su miktarında ciddi artışlara yol açmaktadır. Bu bağlamda ülkeler, toplum sağlığını korumak amacıyla, atık suların güvenli bir biçimde deşarj edilmesini sağlamak için yasal düzenlemeler çerçevesinde çeşitli arıtma süreçlerini zorunlu kılmışlardır.

Atık su arıtma tesislerinde uygulanan bu işlemler sonucunda ortaya çıkan arıtma çamuru, içeriğinde fermente olabilen organik maddeler, patojen mikroorganizmalar, ağır metaller, poliklorlu bifeniller (PCB) gibi zararlı bileşenleri barındırabilen karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, yüksek hacimlerde oluşan arıtma çamurlarının gelişigüzel bertarafı hem çevresel hem de sağlık açısından mümkün değildir (Akdemir, 2020).

Evsel veya endüstriyel atık suların arıtılması sürecinde uygulanan fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemler sonucunda, kendiliğinden çöken; sıvı ya da yarı katı halde, genellikle kokulu ve ağırlıkça %0,25 ile %12 arasında katı madde içeren atıklar, “ham arıtma çamuru” veya kısaca “ham çamur” olarak adlandırılmaktadır. Bu ham çamurlar, çeşitli stabilizasyon işlemleri ile çevresel ve ekolojik açıdan kullanıma uygun hale getirildikten sonra; “işlenmiş çamur”, “arıtma çamuru” ya da “biyokatı” şeklinde tanımlanmaktadır (Özalp, 2005).

Arıtma çamuru, atık su arıtma sistemlerinin kaçınılmaz bir yan ürünü olarak kabul edilir ve atık yönetimi açısından önemli çevresel, ekonomik ve teknik sorunlar barındırır. Arıtma çamurunun bileşimi ve miktarı; kullanılan arıtma teknolojisi, atık suyun kaynağı, mevsimsel değişkenlikler ve çamurun işlenme yöntemine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir.

Atık su arıtma çamuru, evsel ve endüstriyel atık suların fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma süreçleri sonucunda oluşan; yüksek oranda su, organik madde ve çeşitli kirleticiler içeren yarı katı bir atık materyalidir. Bu çamurun karakteristik

özellikleri; uygulanan arıtma prosesine, atık suyun kaynağına ve varsa uygulanan ön arıtma düzeyine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilir (Mut, 2017). Arıtma çamurunun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin ayrıntılı olarak analiz edilmesi, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de çamurun uygun işleme ve bertaraf yönteminin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Fiziksel Özellikler;

Arıtma çamurlarının en dikkat çekici fiziksel özelliği yüksek su içeriğidir. Yeni oluşmuş ham çamurun %95-99'u sudan oluşurken, bu oran susuzlaştırma işlemleriyle %70-80 seviyelerine düşürülebilir. Çamurun özgül ağırlığı 1.02–1.06 g/cm³ arasında değişmekte olup, akışkanlık ve pompalanabilirlik gibi faktörler bu özelliğe bağlıdır.

Ayrıca çamur partikül büyüklüğü, hacimce yoğunluğu, viskozitesi ve katı madde oranı gibi özellikler de mekanik işleme yöntemlerini (örneğin çamur kurutma, presleme, santrifüjleme) doğrudan etkiler. Çizelge 2.1’de arıtma çamurunun fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Arıtma çamurunun fiziksel özellikleri (Dede, 2009).

Özellik	Açıklama
Nem İçeriği	Genellikle %70-98 arasında değişir. Susuzlaştırılmış çamurda bu oran %60’a kadar indirilebilir.
Yoğunluk	Ham çamur için 1000–1050 kg/m ³ ; yoğunlaştırılmış çamurda 1040–1080 kg/m ³ .
Renk ve koku	Genellikle siyah-kahverengi; çürümüş maddelerden dolayı yoğun ve karakteristik bir kokuya sahiptir.
Partikül büyüklüğü	0,1–500 µm; flok yapıları içerir.

Kimyasal Özellikler;

Arıtma çamurlarının kimyasal bileşimi, çamurun oluştuğu atık suyun karakteriyle doğrudan ilişkilidir. Genel olarak şu maddeleri içerir:

- **Organik madde:** Biyolojik olarak parçalanabilir nitelikte olup karbon, hidrojen, azot ve fosfor içerir.
- **Besin elementleri:** Özellikle azot (N) ve fosfor (P), tarımsal amaçlı kullanım açısından önem taşır.
- **Ağır metaller:** Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg), arsenik (As), çinko (Zn) gibi metaller, çamurun yeniden kullanımında sınırlayıcı faktörler olabilir.
- **İz elementler ve tuzlar:** Demir (Fe), bakır (Cu), mangan (Mn), sodyum (Na) vb. maddeler, hem bitki sağlığı hem de toprak özellikleri üzerinde etkilidir.
- **pH ve elektriksel iletkenlik:** Çamurun alkali ya da asidik özelliği, stabilizasyon süreci ve bertaraf yöntemini etkileyebilir.

Arıtma çamurunun kimyasal özelliklerine ilişkin veriler Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Arıtma çamurunun kimyasal özellikleri (Dede, 2009).

Parametre	Değer Aralıkları	Açıklama
Organik Madde (OM)	%40–70 (Kuru Madde üzerinden)	Yüksek OM içeriği biyolojik stabilizasyonu zorlaştırır, enerji geri kazanımı için potansiyel oluşturur.
Toplam Katı Madde (TSS)	%1–10 (Ham çamurda)	Susuzlaştırmayla %20–40'a kadar çıkabilir.
Azot (N)	2–6% (KM üzerinden)	Bitkisel üretim açısından faydalı, ancak fazla N çevreye zarar verebilir.
Fosfor (P)	1–3% (KM)	Bitkisel fayda sağlar, geri kazanım açısından önemlidir.
Ağır metaller	(mg/kg KM): Cu: 100–1000, Zn: 500–3000, Pb: 10–500, Cd: 1–10	Endüstriyel atık su içeren çamurlarda daha yüksektir; bertaraf yöntemini sınırlar.
pH	5.5–8.5	Nötr'e yakın pH, biyolojik işlemler için uygundur. Asitlik, ağır metal çözünürlüğünü artırabilir.
Isıl Değer	2500–5000 kcal/kg KM	Yüksek OM oranı sayesinde enerji geri kazanımında kullanılabilir.

Biyolojik Özellikler;

Arıtma çamurları, özellikle evsel kaynaklı atık suların arıtılması durumunda yüksek miktarda mikroorganizma içerir. Bu mikroorganizmaların büyük kısmı aerop ve anaerop bakterilerden oluşur. Ayrıca çamur içinde;

- Patojen mikroorganizmalar (ör. *E. coli*, *Salmonella*, enterovirüsler),
- Parazitler (ör. helmint yumurtaları),
- Biyolojik stabiliteyi etkileyen mikrofloralar

bulunabilir. Bu biyolojik içerik, çamurun yeniden kullanımına dair risk değerlendirmelerinde önemli bir parametredir. Bu nedenle çamurun hijyenizasyonu (örneğin ısıtma, pastörizasyon veya kireçleme gibi) gerekli hale gelebilir. Arıtma çamurunun biyolojik özellikleri Çizelge 2.3 'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Arıtma çamurunun biyolojik özellikleri.

Özellik	Açıklama
Mikroorganizma içeriği	Yüksek sayıda bakteri (özellikle koliformlar), virüs ve patojen içerir. Stabilizasyon ve hijyenizasyon gerektirir.
Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ)	300–2000 mg/L
Stabilite	Ham çamur kararsızdır; çürütme veya kompostlama ile stabilize edilir.
Patojenler	<i>Salmonella</i> , <i>E. coli</i> , enterovirüsler vb.

2.1.2 Arıtma çamurunun sınıflandırılması

Arıtma çamurları, oluşum aşamaları ve içeriklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, çamurun işleme gereksinimlerini ve bertaraf yöntemlerini belirlemede kritik bir öneme sahiptir. Genel olarak arıtma çamurları aşağıdaki başlıklar altında sınıflandırılır:

2.1.2.1 Kaynaklarına göre sınıflandırma

- **Evsel Kaynaklı Arıtma Çamurları:** Genellikle belediye atık su arıtma tesislerinde oluşur. Organik madde ve patojen mikroorganizma açısından zengindir, ancak ağır metal içeriği nispeten düşüktür.

- **Endüstriyel Kaynaklı Arıtma Çamurları:** Sanayi tesislerinden kaynaklanır. İçeriğinde toksik kimyasallar, ağır metaller ve spesifik kirleticiler bulunabilir.
- **Karışık Kaynaklı Arıtma Çamurları:** Evsel ve endüstriyel atık suların birlikte arıtıldığı sistemlerde oluşur. Hem organik yük hem de toksik madde açısından daha karmaşık yapıya sahiptir.

2.1.2.2 Oluşum aşamalarına göre sınıflandırma

- **Ön Çökeltim Çamuru (Primer Çamur):** Fiziksel arıtma sürecinde (ör. çökeltim tanklarında) dibe çöken inorganik ve organik katı maddelerden oluşur. Suyla doygun, çürümeye eğilimli ve kötü kokuludur.
- **Biyolojik (Aktif) Çamur:** Biyolojik arıtma basamaklarında, mikroorganizmaların organik maddeyi parçalayarak oluşturduğu biyokütledir. Daha düşük kuru madde içerir.
- **Kimyasal Çamur:** Kimyasal çöktürme (ör. fosfor giderimi için demir/alüminyum tuzları kullanımı) sonucu oluşur. Kimyasal katkılar nedeniyle farklı yapısal özelliklere sahiptir.
- **Tersiyer (Üçüncül) Arıtma Çamuru:** Gelişmiş arıtma sistemlerinde (ör. ileri filtrasyon, membranlar) oluşan ince partiküller içeren çamurdur. Miktarı düşüktür ancak işlenmesi zordur.

2.1.2.3 Fiziksel durumlarına göre sınıflandırma

- **Ham Çamur (Raw Sludge):** Arıtma ünitesinden doğrudan çıkan, herhangi bir ön işleme tabi tutulmamış çamurdur.
- **Stabilize Çamur:** Çürütme, kireç stabilizasyonu veya ısıtma işlemi gibi yöntemlerle biyolojik olarak stabilize edilmiş ve kötü kokularla patojenlerin azaltıldığı çamurdur.
- **Susuzlaştırılmış Çamur:** Santrifüj, filtre pres veya vakum filtre gibi yöntemlerle su içeriği azaltılmış formdur. Taşıma ve bertaraf açısından daha elverişlidir.
- **Kurumuş Çamur:** Termal kurutma veya doğal kurutma yoluyla nem oranı %10'un altına indirilmiş, katı hale getirilmiş çamurdur.

2.2 Arıtma Çamuru Bertaraf Yöntemleri

Arıtma çamurlarının nihai bertarafı; çevresel, iklimsel, uygulanabilirlik ve ekonomik kriterler ile arıtma çamurunun özellikleri de göz önüne alınmak suretiyle çeşitli yöntemler kullanılarak yapılır. Atık su arıtma tesislerinden elde edilen çamurlar içerikleri edeniyle uygulanabilirlik açısından özellikli ürün özelliğine sahiptir. Ancak evsel nitelikli er tür arıtma çamurlarında çok sayıda ve farklı özelliklere haiz zararlı organizma ulunabileceğinden dolayı, bu arıtma çamurlarının doğrudan doğruya araziye dökülmesinde çeşitli sakıncalar vardır (Düzgün, 2018). Endüstriyel atık ağırlıklı arıtma çamurları ise, içyapılarında mevcut bulunan ağır metaller ve tuzları ile toksik maddeler vb. nedenlerden olayı doğrudan araziye bertarafı tehlikeli sonuçlara yol açabilecektir. Çünkü bu etkenler hem yeraltı suyunu hem de toprağın kirlenmesi neden olacaktır.

Atık su arıtma tesislerinden açığa çıkan çamurlar; yüksek organik madde, azot, fosfor ve karbon içerir ve aynı zamanda patojenler ile ağır metaller barındırabilir. Bu özellikleri nedeniyle uygun yöntemlerle işlenmesi ve bertaraf edilmesi gerekir. Çamur yönetimi, tesis inşaat ve işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturur (tesis maliyetinin %20–50’si). Dünya genelinde atık su çamurlarının yaklaşık %14’ü düzenli depolama sahalarına, %27’si yakma tesislerine, %42’si tarımsal alanlara uygulanarak, %17’si ise sanayi atıklarında hammadde olarak kullanılmaktadır (Şağban ve Demir, 2020). Bu dağılım, hem ekonomik hem çevresel açılardan karmaşık değerlendirmeler yapılması gerektiğini göstermektedir.

2.2.1 Toprakta kullanım

Atık su arıtma çamurlarının bünyesinde yer alan çeşitli organik ve inorganik bileşikler, bu atıkların toprak düzenleyici olarak yeniden değerlendirilmesi olasılığını gündeme getirmektedir (Şağban ve Demir, 2020).

Kentsel atık su arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurların azot, fosfor ve diğer mikro besin elementlerini içermesi, bu çamurların tarımsal alanlarda kullanımına olanak sağlamıştır (Bayındır, 2021). Arıtma çamurlarının tarımda değerlendirilmesi ile hem topraklara gerekli besin elementleri sağlanabilir hem de atık durumundaki çamurun bertarafı gerçekleştirilebilir. Arıtma çamurunun toprakta kullanımı, "Evsel

ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik" kapsamında, gerekli çevresel ve sağlıkla ilgili tedbirlerin alınması esasına dayanmaktadır. Bu esaslar, arıtma çamurlarının sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu şekilde toprakta güvenli bir biçimde kullanılmasını amaçlamaktadır (Hanay ve Hasar, 2007).

Evsel ve kentsel atık suların arıtılması sonucunda ortaya çıkan arıtma çamurlarının toprakta güvenli biçimde kullanılabilmesi için, çevresel ve insan sağlığı açısından risk oluşturmayacak şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, ilgili yönetmelik; arıtma çamurlarının toprak, bitki, hayvan ve insan sağlığına zarar vermeden, kontrollü biçimde kullanımına yönelik teknik ve idari esasları düzenlemektedir. Çamurun tarımsal amaçla kullanılabilirliğini belirlemek için; toprağın pH değeri, yapısal özellikleri, organik madde içeriği, alanın yer altı ve yüzey sularına olan mesafesi ile arazinin eğimi gibi çeşitli çevresel kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir (Demir ve Çimrin, 2011). Söz konusu yönetmelikte belirtilen analiz ve sınır değerlerin sağlanması durumunda, atık su arıtma tesislerinde oluşan çamurlar, tarım alanlarında kullanılmak üzere değerlendirilme imkânına sahiptir.

Çamuru arazide kullanmanın faydası açıktır. Çiftçiler tarafından kullanılan ticari gübre miktarı potansiyel olarak azalacaktır. Çamurdaki besin maddeleri tek başına bölgede yararlar sağlayabilecek ve organik madde toprak koşullarını iyileştirebilecektir. Geniş bir bağlamda bakılacak olursa, arazide çamurun veya diğer atıkların fosfor içeriğinin yeniden kullanımı tarımın sürdürülebilirliği bakımından giderek önemi artan bir konu olmaktadır.

Çamur, ağaçlandırma için toprak koşullarının iyileştirilmesinde kullanılabilir. Arıtma çamurunun, humus eksikliği, sıkıştırılmış üst tabakalar ve erozyon biçiminde karakteristik özellikleri olan bölgelerde tekrar kullanılması önerilir. Çamurun, doğaya kazandırma projelerinde tekrar kullanılmasından aşağıdaki yararların sağlanması beklenmektedir:

- Toprak özelliklerinin iyileştirilmesi;
- Organik madde içeriği ve su tutma kapasitesinin artırılması;
- Toprağı koruyan bitkilerin büyüme koşullarının iyileştirilmesi.

İlgili yönetmelik kapsamında, stabilize arıtma çamurlarının doğal orman ekosistemlerinde kullanımı açıkça sınırlandırılmış ve yasaklanmıştır.

Doğaya kazandırma ve çevre düzenlemesi çamur bertaraf yöntemleri olarak değerlendirilebilir. Çamur ayrıca, yarı miktarda çakıl ile karıştırıldıktan ve kuvvetli alt tabakalar yaptıktan sonra çevre düzenlemesi gibi tarım dışı amaçlarla veya bozulmuş alanların tekrar bitki örtüsü kazandırma için doğaya kazandırılması amacıyla kullanılabilir.

Belediyeler bahçelerin bakımını yapmak için düşük miktarda hayvan gübresi kullanmaktadır. Çamur potansiyel olarak bunun yerini alabilir. Ancak, buralarda halka açık alanlar bulunması ve uygulama için gerekli çamurun elle işlenecek olmasından dolayı, çamurun kabul edilebilir olması için çok yüksek bir standarda göre işlenmesi gerekmektedir.

2.2.2 Enerji geri kazanımı (yakma – termal bertaraf)

Arıtma çamurundaki organik maddenin kalorifik değeri, düşük kaliteli bir kömürün kalorifik değerine benzerdir ve yüksek enerji kullanan birçok imalat prosesi ve enerji üretiminde tamamlayıcı yakıt olarak kullanılma potansiyeli vardır. Organik katı maddeler, esas olarak önemli bir kalorifik değere sahip karbonhidratlar, proteinler ve yağlardan oluşmaktadır. Bununla beraber, organik maddenin kalorifik değeri anaerobik çürütme ile azaltılmaktadır. Çamurda bulunan silis, alüminyum, kalsiyum ve demir gibi inorganik elementler, kireçtaşı ve kil gibi çimento elementlerine çok benzerdir (Adar, 2018).

Gazlaştırma, organik veya fosil bazlı karbonlu malzemeleri karbon monoksit, hidrojen ve karbondioksit döndüren bir süreçtir. Bu, malzemenin yanmadan yüksek sıcaklıklarda ($> 700^{\circ}\text{C}$) kontrollü miktarda oksijen ve / veya buharla reaksiyona sokulmasıyla elde edilir. Gaz karışımına sentez gazı (sentez gazı veya sentetik gazdan) denir ve kendisi bir yakıttır.

Arıtma çamurunun gazlaştırılması ve elde edilen gazın yakılmasıyla üretilen enerji, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Gazlaştırma işlemi sonucunda ortaya çıkan nihai yan ürün; inert özellikte, süzülmeyen, granüler yapıda

ve kuru formdadır. Bu granül yan ürün, yüksek potasyum ve fosfor içeriği sayesinde tarımsal açıdan değerli bir gübre niteliği taşımaktadır (Özen, 2023).

Yanma proseslerinde çamurun enerji geri kazanımı, çamurun çevresel olarak yararlı yeniden kullanımı ihtiyacını ve CO₂ emisyonlarını azaltan düşük maliyetli ve yenilenebilir enerji kaynağı ihtiyacını dengelemektedir. Çamurun enerji değeri, ısı ve enerji üretimi için endüstriyel proseslerde yanma yoluyla geri kazanılabilmektedir. Arıtma çamurlarının yakıt olarak kullanımı, kömürle çalışan elektrik santralleri ve çimento üretim tesislerinde uygulanabilmektedir. Bu tür uygulamalarda, kullanılan yakıtın yaklaşık %5 ila %10'u arıtma çamuru ile ikame edilebilmektedir. Çamurun yakılması sonucunda oluşan kül, düzenli depolama alanlarında bertaraf edilebildiği gibi, yapı malzemelerinin bazı özelliklerini geliştirmek amacıyla inşaat sektöründe de değerlendirilebilmektedir (Metik, 2018).

Arıtma çamurunun yanmasıyla geriye kalan kül, bileşim açısından çimento hammaddesine oldukça yakın olduğundan, organik kısmın yanmasının ardından kalan mineral içerik çimento üretiminde hammadde olarak değerlendirilebilmektedir (Ordu ve Öztürk, 2017). Bu uygulama, yalnızca enerji maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda fosil olmayan bir yakıtın kullanılması sayesinde enerji yoğun proseslerden kaynaklanan net karbondioksit (CO₂) emisyonlarının azaltılmasına da yardımcı olmaktadır.

Arıtma çamurunun çimento fabrikalarında alternatif yakıt ve hammadde olarak kullanılması durumunda, çevreye salınan hava ve su kirleticilerinin konsantrasyonlarının belirlenebilmesi amacıyla düzenli izleme çalışmaları yapılmalıdır (Öztürk, 2016). Bu ölçüm ve kontrol süreçleri, 06.10.2010 tarihli ve 27721 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 14344 sayılı Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik kapsamında tanımlanmıştır. Günlük emisyonların sınır değerleri aşmaması için bu ölçümler sürekli olarak takip edilmeli ve gerekli çevresel önlemler alınmalıdır.

Arıtma çamuru kurutmaya tabi tutulması sonrası hala atık olup, yapı malzemelerinde kullanılması uygun değildir (Çelik ve Öner, 2003).

2.2.3 Anaerobik çürütme (biyogaz üretimi)

Son yıllarda enerji güvenliği, iklim değişikliği ve doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel sorunlara ilişkin artan endişeler, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik çalışmaları hızlandırmıştır. Bu kapsamda, organik atıkların yenilenebilir enerji üretiminde kullanılması önemli bir odak noktası hâline gelmiştir. Bu atıklar arasında, kanalizasyon çamuru ikinci nesil biyoyakıt üretimi için umut vadeden bir hammadde olarak öne çıkmaktadır (Mitraka, 2024).

Biyogaz, organik maddenin kütlesini oluşturan yağların, proteinlerin ve karbonhidratların parçalanması nedeniyle biyokütlenin anaerobik yollarla çürütülmesi ile elde edilir (Türkmenler, 2019). Oksijensiz ortamda mikroorganizmalar yardımıyla çamurdaki organik madde parçalanır, metan ve karbondioksit içeren biyogaz üretilir.

Biyogaz üretimi, farklı organik atıklarda bulunan kimyasal enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesi sürecinde alternatif ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Türkmenler, 2019). Atık su arıtma tesislerinden elde edilen arıtma çamurları, yüksek organik madde içerikleri sayesinde biyogaz üretimi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Anaerobik çürütme yöntemiyle bu çamurlardan elde edilen biyogaz, hem tesisin enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılmakta hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Arıtma çamurunun çürütülmesi sürecinde elde edilen biyogaz, önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Türkiye’de biyogaz teknolojisi özellikle elektrik enerjisi üretiminde kullanılmakta ve bu alanda giderek artan bir uygulama alanı bulmaktadır. Biyogaz; başta hayvansal atıklar ve bitkisel artıklar olmak üzere, organik maddelerin oksijensiz (anaerobik) ortamda mikrobiyal faaliyetlerle parçalanması sonucu oluşan, yüksek ısıl değere sahip metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) gazlarının karışımından oluşmaktadır (Gönüldinç, 2006). Biyogaz üretimi, oksijensiz ortamda (anaerobik) gerçekleşen biyolojik bozunma sürecinin bir sonucu olarak ortaya çıkmakta olup; biyolojik olarak parçalanabilir atıklar ve kanalizasyon çamurları gibi organik içerikli maddelerin kapalı reaktörlerde parçalanmasıyla gerçekleşir. Bu sistemlerde çamur, sıcaklığa bağlı olarak 20 ila 30 gün boyunca kapalı tanklarda bekletilmekte ve bu süre zarfında metan gazı üretimi

sağlanmaktadır (Özalp, 2005). Biyogaz, sahip olduğu yüksek enerji potansiyeli sayesinde doğrudan ısınma ve aydınlatma amacıyla kullanılabilmekte; ayrıca elektrik ve mekanik enerji üretimi için de değerlendirilebilmektedir (Gönüldinç,2006). Biyogaz üretimi, özellikle gelişmiş ülkelerde uygulanabilirliği yüksek bir teknoloji olarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta ve çevre koruma açısından uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu süreç sonucunda elde edilen çürütme ürünü ise hijyenik özellikleriyle dikkat çeken, güvenli bir gübre ve toprak düzenleyici olarak tarımsal amaçlarla kullanılabilir (Miranzadeh vd. , 2024).

2.2.4 Düzenli depolama ile bertaraf

Arıtma çamurlarının düzenli depolanması; yalnızca bu tür atıkların kabul edildiği monolitik (tek tip) depolama alanlarında ya da kentsel katı atıklarla birlikte karışık şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntem, genellikle çamurların araziye uygulanması ya da başka bir yararlı kullanım alternatifinin teknik, çevresel veya sosyo-ekonomik nedenlerle mümkün olmadığı durumlarda başvurulacak bir bertaraf seçeneğidir (Yüksekdağ vd., 2020). Düzenli depolama tercihinin ön plana çıkmasında aşağıdaki durumlar etkili olabilmektedir:

- Arıtma çamurunun tarımsal amaçla kullanımına uygun nitelikte arazi bulunamaması,
- Çamur içeriğinde ağır metaller veya diğer kirletici maddelerin yüksek konsantrasyonlarda bulunması,
- Alternatif kullanım veya geri kazanım seçeneklerinin uygulanması durumunda oluşabilecek koku problemleri nedeniyle toplumdan gelen tepkiler.

2.2.5 İnşaat malzemesi üretimi (yeniden kullanım)

Arıtma çamurlarının alternatif bertaraf yöntemlerinden biri de kurutulmuş ve ön işlemlerden geçirilmiş çamurun inşaat sektöründe değerlendirilmesidir. Bu yaklaşım, atık yönetimi ile malzeme geri kazanımı arasında bir köprü kurarak hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlamaktadır.

Beton Yapımında Kullanımı;

Arıtma çamuru külü, çimento üretiminde bağlayıcı madde olarak kısmi ikame amacıyla kullanılabilir. Yapılan çalışmalar, çamur külü oranı arttıkça betonun priz süresinin uzadığını ancak mekanik dayanımın ve yapı özelliklerinin standartlar dahilinde kaldığını ortaya koymuştur. Bu da çamur kaynaklı külün beton üretiminde teknik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Hafif Ağırlıklı Agregat Üretimi;

Kurumuş arıtma çamurunun yaklaşık 1050–1100 °C sıcaklıklarda yakılmasıyla elde edilen küller, hafif agregaların üretiminde kullanılabilir. Bu agregalar, düşük ısı iletkenlik ve yüksek yangın dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Bu yönüyle özellikle ısı yalıtımı ve yangına dayanıklı beton üretiminde tercih edilmektedir.

Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanımı;

Arıtma çamurlarının belirli oranlarda kireçtaşı tozu ile karıştırılarak yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi sonucu bağlayıcı özellikte malzemeler üretilmektedir. Bu tür ürünler, inşaat sektöründe çeşitli yapısal ve altyapı malzemelerinde katkı maddesi olarak değerlendirilebilir. Bu yöntemler, arıtma çamurunun çevresel etkilerini azaltırken aynı zamanda atıktan değerli ürün elde edilmesini sağlayarak döngüsel ekonomiye katkı sunmaktadır.

2.2.6 Kompostlama

Kompostlama, organik içerikli atıkların kontrollü aerobik (oksijenli) koşullar altında mikroorganizmalar aracılığıyla biyolojik olarak parçalanması, stabil hale getirilmesi ve patojen yükünün azaltılması sürecidir. Bu süreç sonucunda çevreye zarar vermeyen, olgunlaşmış bir organik ürün elde edilir. Kompostlama aynı zamanda, bertaraf edilemeyen ham atıkların hem katı atık depolama sahalarında hem de toprak uygulamalarında değerlendirilmesine olanak tanıyan sürdürülebilir bir yöntemdir (Günay ve Dursun, 2018).

Atık su arıtma tesislerinden elde edilen çamurlar, yüksek oranda organik madde içermeleri nedeniyle kompostlama yoluyla değerlendirilmeye uygundur. Arıtma

çamurlarının kompostlanması sırasında mikroorganizmalar, çamur içeriğinde bulunan biyolojik olarak parçalanabilir bileşenleri oksijenli ortamda ayrıştırır.

Bu esnada ortaya çıkan biyolojik ısı, sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla patojen organizmaların yok edilmesine katkı sağlar. Aynı zamanda, çamurun hacmi azalır ve organik madde daha kararlı formlara dönüşür. Arıtma çamuru tek başına kompostlamaya uygun değildir; bu nedenle karbon/azot (C/N) oranının dengelenmesi amacıyla karbonca zengin materyallerle (örneğin: ağaç yongaları, saman, bahçe atıkları, odun talaşı) karıştırılmalıdır. İdeal C/N oranı genellikle 25:1 ile 35:1 arasında olmalıdır.

Arıtma çamurundan elde edilen kompostun toprakta kullanılabilmesi için bazı kriterleri sağlaması gerekir. Bu kriterler arasında ağır metal içeriği, patojen yükü, olgunluk ve stabilite yer alır. Avrupa Birliği ve Türkiye’de bu konuda çeşitli standartlar mevcuttur. Türkiye’de, arıtma çamurunun toprakta kullanılabilirliğine dair kriterler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın “Toprakta Kullanılacak Arıtma Çamurlarının Kontrolü Yönetmeliği” ile belirlenmiştir. Çizelge 2.4 ‘de bertaraf yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.4. Bertaraf yöntemlerinin karşılaştırılması.

Yöntem	Enerji Geri Kazanımı	Çevresel Etki	Maliyet	Teknik Zorluk	Kaynak Geri Kazanımı
Toprakta kullanım	Düşük	Orta	Düşük	Düşük	Organik madde, N, P
Yakma	Yüksek	Orta-Yüksek	Yüksek	Orta-Yüksek	Enerji, kül
Anaerobik Çürütme	Orta	Düşük	Orta	Orta	Biyogaz, stabilize çamur
Düzenli Depolama	Yok	Orta-Yüksek	Düşük	Düşük	Yok
İnşaat Kullanım	Orta	Düşük-Orta	Orta	Orta-Yüksek	Kül, mineral katkı
Kompostlama	Düşük-Orta	Düşük	Orta	Orta	Kompost, humus

2.3 Artıma Çamuru İle İlgili Türkiye'deki ve Dünyadaki Durum

2.3.1 Türkiye'deki durum

Türkiye'de arıtma çamurlarının yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak geri kazanımı açısından giderek daha önemli hale gelmektedir. Son yıllarda atık su arıtma tesisi sayısındaki artışa paralel olarak arıtma çamuru üretimi de ciddi ölçüde artmış, 2022 itibarıyla yıllık yaklaşık 1 milyon ton yaş çamur üretildiği rapor edilmiştir. Ancak bu artış, çamurun bertarafı konusunda yeni altyapı ihtiyaçlarını da beraberinde getirmiştir. Türkiye'de arıtma çamurlarının büyük bir kısmı hâlâ düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmekte olup, bu yöntem hem ekonomik kaynak kaybına hem de çevresel risklere neden olmaktadır. Kompostlama, biyogaz üretimi ve çimento fabrikalarında ortak yakma gibi alternatif yöntemler bazı büyükşehir belediyeleri tarafından uygulanmaya başlanmış olsa da, bu uygulamaların yaygınlığı sınırlıdır. Mevzuat açısından ise Türkiye, Avrupa Birliği ile uyumlu yönetmelikler yayınlamış olmasına rağmen, uygulamada teknik, mali ve idari zorluklar sürmektedir.

"Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik", 3 Ağustos 2010 tarihli ve 27661 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Yönetmeliğin temel amacı, evsel ve kentsel kaynaklı atık suların arıtılması sonucu oluşan çamurların tarım topraklarında kullanımına yönelik çevresel önlemlerin alınmasını sağlamak ve bu süreci sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu biçimde düzenlemektir.

Yönetmelik kapsamında; arıtma çamurlarının insan sağlığı, hayvanlar, bitkiler ve genel çevre üzerindeki olası olumsuz etkilerinin önlenmesi amacıyla, bu çamurların kontrollü şekilde toprakta kullanılmasına ilişkin teknik ve idari esaslar belirlenmiştir. Bu doğrultuda, çamurda bulunabilecek ağır metaller, patojen mikroorganizmalar ve diğer kirletici bileşenlerin belirli sınırlar içerisinde tutulması zorunlu kılınmakta; ayrıca uygulama yapılacak toprakların özelliklerinin önceden değerlendirilmesi gerekmektedir. Yönetmelik aynı zamanda, çamurun uygulanacağı alanların belirlenmesi, ön analiz süreçleri, izin mekanizmaları ve denetim prosedürleri gibi hususlara dair ayrıntılı hükümler içermektedir. Söz konusu düzenlemeler, atık yönetiminde çevresel güvenliğin sağlanması kadar, çamurların tarımsal üretimde

ikincil kaynak olarak değerlendirilmesini ve geri kazanım ilkesi doğrultusunda ekonomiye kazandırılmasını da desteklemektedir.

Yönetmeliğin 5. Maddesi ile ham çamurun araziye uygulanması yasaklanmaktadır. “Stabilize arıtma çamuru yönetmeliğin 6. maddesine göre ağır metal konsantrasyonu, organik bileşikler, dioksinler patojenlerle ilgili olarak Ek I-B, I-C ve I-D'sinde belirtilen sınır değerlere uyulması halinde yönetmeliğin Ek I-A'sında verilen standartlara uygun toprakta uygulanabilmektedir.” Yönetmelik ile ayrıca arıtma çamurunun toprağa uygulaması için stabilize arıtma çamurunun minimum %40 organik içeriğe sahip olması şartı getirilmektedir.

Toprakta stabilize arıtma çamuru kullanımına ilişkin sınır değerler Çizelge 2.5 'de ve maksimum ağır metal konsantrasyonları Çizelge 2.6 'da verilmiştir.

Çizelge 2.5. Ek I-A Topraktaki ağır metal sınır değerleri.

Ağır Metal (Toplam)	6≤pH<7mg.kg⁻¹ Fırın Kuru Toprak	pH ≥ 7 mg.kg⁻¹ Fırın Kuru Toprak
Kurşun	70	100
Kadmiyum	1	1,5
Krom	60	100
Bakır	50	100
Nikel	50	70
Çinko	150	200
Cıva	0,5	1

Çizelge 2.6. Ek 1-B Toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek maksimum ağır metal konsantrasyonları (Gökal, 2014).

Ağır Metal (Toplam)	Sınır Değerler (mg kg⁻¹ kuru madde)
Kurşun	750
Kadmiyum	10
Krom	1000
Bakır	1000
Nikel	300
Çinko	2500
Cıva	10

Toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek organik bileşiklerin konsantrasyonlarının ve dioksinlerin sınır değerleri konsantrasyonları Çizelge 2.7 'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Ek I-C Toprakta kullanılacak stabilize arıtma çamurundaki organik bileşiklerin konsantrasyonlarının ve dioksinlerin sınır değerleri (Ergin, 2013).

Organik Bileşikler	Sınır değerler (mg kg⁻¹ kuru madde)
AOX (Adsorblanabilen organik halojenler)	500
LAS (Lineer alkilbenzin sülfonat)	2 600
DEHP (Diftalat(2-ethylhexyl))	100
NPE (Nonil fenol ile 1 ve 2 etoksi grubu olan nonil fenol etoksilatların toplamını içerir)	50
PAH (Polisiklik aromatik hidrokarbon veya poliaromatik hidrokarbonların toplamı)	6
PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180 sayılı poliklorlu bifenil bileşiklerinin toplamı)	0.8
Dioksinler	ng Toksik Eşdeğer.kg- 1 kuru madde
PCDD/F Poliklorlu dibenzodioksin/dibenzofuranlar	100

EK I-D Mikrobiyolojik Analiz; arıtma çamuruna uygulanan stabilizasyon işlemleri sonucunda, halk sağlığını korumak amacıyla mikrobiyolojik açıdan belirli hijyen kriterlerinin sağlanması zorunludur. Bu çerçevede, özellikle dışkı kaynaklı bulaşıcılığı göstergesi olarak kullanılan Escherichia coli (E. coli) düzeyinin, uygulanan stabilizasyon yöntemi sonucunda en az 2 log₁₀ (yaklaşık %99) oranında indirgenmesi gerekmektedir.

Bu kriter, patojen mikroorganizmaların azaltılması ve çevreye uygulanacak çamurun biyolojik güvenliğinin sağlanması açısından önemli bir eşik değeri temsil etmektedir. Stabilizasyon yöntemleri arasında aerobik ya da anaerobik çürütme, ısı kurutma ve kimyasal koşullandırma gibi işlemler yer almakta olup, bu tekniklerin etkinliği mikrobiyolojik analizlerle doğrulanmalıdır.

Ayrıca, arıtma çamurunun tarımda ve toprakta kullanımı için yönetmelikte aşağıdaki sınırlamalar getirilmiştir:

- Bu kapsamda, stabilize çamurların meyve ağaçları dışında, doğrudan toprağa dokunan ve çiğ olarak tüketilen sebze ve meyve türlerinin dikildiği tarım

arazilerinde kullanımı yasaklanmıştır. Bu düzenleme, halk sağlığının korunması ve olası patojen bulaş riskinin önlenmesi amacıyla getirilmiş olup, çamurun sadece uygun analizlerden geçmiş ve ağır metal-patojen sınır değerlerini sağlayan şekliyle belirli tarım alanlarında kullanılmasına izin verilmektedir.

- Stabilize arıtma çamurunun tarımsal arazilerde kullanım miktarının belirlenmesinde çeşitli çevresel ve tarımsal faktörler dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda; yer altı ve yer üstü su kaynaklarının korunması, toprak kalitesinin sürdürülebilirliği ve yetiştirilecek bitkilerin besin maddesi ihtiyaçları temel belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. Uygulama miktarı, hem toprakta birikim riskini azaltmak hem de uzun vadeli verimliliği korumak amacıyla sınırlandırılmakta ve düzenli analizlerle kontrol edilmektedir.
- Toprak pH değeri, çamur uygulamasının çevresel güvenliği açısından kritik bir parametredir. Bu bağlamda, pH değeri 6'nın altında olan asidik topraklara stabilize arıtma çamurunun uygulanması yasaktır. Bu sınırlama, özellikle ağır metallerin hareketliliğinin asidik koşullarda artması ve bitki ile yer altı suyu yoluyla gıda zincirine geçiş riskinin yükselmesi nedeniyle getirilmiştir. Dolayısıyla çamur uygulamasından önce toprak analizlerinin yapılması ve pH seviyesinin uygun aralıkta olduğunun teyit edilmesi yasal ve çevresel bir gerekliliktir.
- Stabilize arıtma çamurunun, hayvan yemi üretimi yapılan tarım alanlarında veya hayvan otlatılacak meralarda kullanımı, belirli süre kısıtlamalarına tabidir. Özellikle coğrafi ve iklimsel koşullar dikkate alınarak, çamur uygulaması yapılan alanlarda hayvan otlatmasına veya yem bitkilerinin hasadına ancak uygulamadan en az dört hafta sonra izin verilmektedir. Bu süre zarfı, arıtma çamurunda bulunabilecek patojen mikroorganizmaların çevresel etkilere maruz kalarak inaktivasyonunu sağlamak ve hayvan sağlığı üzerindeki olası riskleri en aza indirmek amacıyla belirlenmiştir.
- Stabilize edilmiş arıtma çamurlarının kullanımı, su kaynaklarının korunmasına yönelik çevresel güvenlik önlemleri çerçevesinde çeşitli coğrafi ve hidrolojik sınırlamalara tabi tutulmuştur. Bu doğrultuda, arıtma çamurlarının; içme ve kullanma suyu teminine yönelik kıta içi yüzeysel su kaynaklarının havzalarında, yer altı suyu besleme alanlarında ve mutlak, kısa

ve orta mesafeli içme suyu koruma alanlarında kullanılması kesin olarak yasaklanmıştır. Ayrıca, göl, dere, nehir gibi yüzeysel su kaynaklarına 300 metreden daha yakın mesafede bulunan arazilere de arıtma çamuru uygulanmasına izin verilmemektedir. Bu kısıtlamalar, su kaynaklarının biyolojik, kimyasal ve mikrobiyolojik kirlenmeye karşı korunmasını sağlamak amacıyla getirilmiş olup, ihtiyatlılık ilkesi çerçevesinde değerlendirilmekte ve sürdürülebilir su yönetimi hedeflerinin gerçekleştirilmesine hizmet etmektedir.

- Stabilize arıtma çamurlarının uygulanmasında, çevresel güvenliği sağlamak ve potansiyel kirlilik risklerini en aza indirmek amacıyla belirli doğal koşullar altında kullanımına yönelik kısıtlamalar getirilmiştir. Bu doğrultuda, stabilize arıtma çamurlarının sulak alanlar, taşkın alanları ve taşkın riski taşıyan bölgeler ile donmuş, karla kaplı veya suya doymuş topraklarda uygulanması yasaktır. Bu alanlar, çamurun kontrolsüz yayılımı ve yer altı/yüzey su kaynaklarının kirlenmesi açısından yüksek risk taşıdığı için uygulamaya kapalı tutulmaktadır. Ayrıca, yüzey akış riski bulunan arazilerde, gerekli toprak muhafaza önlemleri alınmadan arıtma çamuru uygulanmasına da izin verilmemektedir. Bu sınırlamalar, hem çevre koruma hem de sürdürülebilir toprak ve su yönetimi ilkeleri doğrultusunda kritik önem taşımaktadır.
- Stabilize arıtma çamurunun tarım arazilerinde veya doğal ortamlarda kullanılmasına ilişkin çevresel ve toprak özelliklerine dayalı sınırlamalar, uygulamanın güvenliğini sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, stabilize arıtma çamurunun doğal orman alanlarında kullanımı kesin olarak yasaktır. Ayrıca, toprak özellikleri bakımından da çeşitli kısıtlamalar mevcuttur. Organik madde içeriği %5'in üzerinde olan zengin topraklara arıtma çamuru uygulanamazken, diğer yandan organik madde içeriği %40'ın altında olan stabilize arıtma çamurları da toprakla karıştırılamaz. Bu düzenlemeler, hem toprakta organik dengenin korunması hem de çamurun etkili şekilde fayda sağlaması amacıyla getirilmiştir. Kumlu tıktır topraklar, düşük su ve besin tutma kapasitesine sahip olduklarından stabilize çamur uygulamasına uygun değildir. Benzer şekilde, taban suyu seviyesi yüzeye 1 metreden daha yakın olan alanlarda, yer altı suyu kirliliği riskine karşı çamur uygulaması yasaklanmıştır. Bu sınırlamalar, sürdürülebilir

toprak kullanımı, su kaynaklarının korunması ve ekosistem sağlığının devamlılığı açısından büyük önem taşıtmaktadır.

- Arıtma  amurunun tarımsal alanlarda kullanımına ilişkin düzenlemeler, yalnızca kentsel atık su arıtma tesislerinden elde edilen ve belirli kriterleri karşılayan stabilize çamurları kapsamaktadır. Bu doğrultuda, 8 Ocak 2006 tarihli ve 26047 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe giren Kentsel Atık Su Arıtımı Yönetmeliği kapsamında tanımlanmayan endüstriyel kaynaklı atık suların arıtımı sonucu oluşan stabilize arıtma  amurlarının, tarım topraklarına uygulanması yasaktır (Erkaya, 2024). Endüstriyel atık sular, içeriklerinde yer alabilecek toksik bileşikler, ağır metaller ve diğer kirleticiler nedeniyle insan sağlığı ve  evre açısından ciddi riskler barındırabileceğinden, bu tür çamurların geri kazanım ve bertaraf yöntemleri ayrı değerlendirilmekte ve tarımsal kullanıma açık tutulmamaktadır.
- Stabilize arıtma çamurunun toprakta güvenli ve etkili biçimde kullanılabilmesi için hem çamurun fiziksel/kimyasal özelliklerine hem de uygulama alanının özelliklerine dair çeşitli teknik kriterler belirlenmiştir. Bu kapsamda, stabilize arıtma çamurunun pH değerı 6,0 ile 8,5 arasında olmalı, bu aralık toprakla uyum ve mikrobiyal aktivitenin sağlıklı şekilde sürdürülebilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca, kapasitesi bir milyon eşdeğer nüfusun üzerinde olan atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma  amurlarının, en az %90 kuru madde oranına kadar kurutulması esastır (İşçi, 2006). Bununla birlikte, üretici tarafından teknik ve ekonomik gerekçelere dayalı olarak %90 seviyesine ulaşmanın uygun olmadığı belgelenirse, bu koşul  evre, şehircilik ve İklim Değerikliği Bakanlığı tarafından istisnai olarak esnetilebilmektedir. Uygulama alanının topografik durumu da önemlidir; eğimi %12'yi aşan arazilerde stabilize arıtma çamurunun uygulanması erozyon ve yüzey akış riski nedeniyle yasaktır. Zamanlama açısından ise çamurun toprağa uygulanması, ekim öncesi dönemde olmak üzere erken ilkbahar ya da geç sonbahar mevsimlerinde gerçekleştirilmelidir. Bu uygulama zamanlaması, hem bitki gelişimini desteklemek hem de besin elementlerinin verimliliğini artırmak amacıyla önerilmektedir.

Yönetmelik ayrıca atık su arıtma tesisi işletmecisinin analiz ve raporlama yükümlülüklerini de ortaya koymaktadır.

Türkiye’de su kaynaklarının korunmasına yönelik temel hukuki çerçeve, 31 Aralık 2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmî Gazete ‘de yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ile 10 Ekim 2009 tarihli ve 27372 sayılı Resmî Gazete ‘de yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği İdari Usuller Tebliği kapsamında oluşturulmuştur. Bu düzenlemelerin temel amacı; ülkenin mevcut ve potansiyel su kaynaklarının korunması, sürdürülebilir kullanımının sağlanması ve su kirliliğinin önlenmesine yönelik hukuki ve teknik esasların tanımlanmasıdır. Arıtma çamurlarının yönetimi açısından bu yönetmelikler; su kalitesini korumaya yönelik planlama esaslarını, atık su deşarjına ilişkin ilke ve yasakları, deşarj izinlerinin alınmasına ilişkin prosedürleri, atık su altyapı tesislerine yönelik teknik kriterleri ve izleme-denetim esaslarını kapsamaktadır. Özellikle arıtma çamurunun olduğu atık su süreçlerinde su kalitesinin korunmasına ilişkin bu hükümler, hem kaynakta kirliliğin azaltılmasını hem de bertaraf ve yeniden kullanım stratejilerinin çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda şekillendirilmesini amaçlamaktadır.

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği kapsamında, atık su arıtma tesislerinde (AAT) gerçekleştirilen tüm faaliyetlerin çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler doğurmasının önlenmesi temel bir ilke olarak benimsenmiştir. Bu bağlamda, özellikle atık suyun arıtılarak alıcı ortama boşaltılması süreci ile arıtma çamurlarının yönetimi arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Yönetmelik hükümlerine göre, atık su deşarjı, arıtma çamurlarının uzaklaştırılmasını, yeniden kullanımını veya bertarafını zorlaştıracak nitelikte olmamalıdır. Bu tür olumsuz etkiler, yalnızca çamurun fiziksel ve kimyasal bileşimini değil, aynı zamanda çevresel etkilerini ve bertaraf maliyetlerini de artırabilmektedir.

Yönetmelikte ayrıca, AAT’nin arıtma performansını, çamur işleme ünitelerinin işletilmesini ve çamur değerlendirme süreçlerini olumsuz etkileyen zararlı maddelerin atık su altyapı sistemine verilmesi açıkça yasaklanmıştır. Bu yasaklama, endüstriyel atık su kaynakları başta olmak üzere, kanalizasyon sistemine bilinçsizce deşarj edilen toksik, aşındırıcı, patlayıcı veya biyolojik arıtımı engelleyici bileşenlerin kontrolünü kapsamaktadır. Bu tür maddeler yalnızca biyolojik ve kimyasal arıtma verimini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda oluşan arıtma

çamurunun çevresel olarak güvenli bir biçimde bertaraf edilmesini veya tarımsal amaçlı yeniden kullanılmasını da imkânsız hale getirebilir.

Bu çerçevede, AAT'lerde etkili bir çamur yönetimi için hem ön arıtma yükümlülüklerinin yerine getirilmesi, hem de deşarj standartlarına uyum sağlanması gerekmektedir. Yönetmelik, su kalitesinin korunmasının yanı sıra arıtma çamurlarının sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemlerle işlenmesini teşvik etmektedir. Böylece, atık su yönetimi yalnızca su kirliliğinin önlenmesini değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine uygun çamur yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini de içermektedir.

Türkiye'de toprak kirliliğinin önlenmesine yönelik temel düzenlemelerden biri, Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirilenmiş Sahalara Dair Yönetmelik'tir. Bu yönetmelik, 8 Haziran 2010 tarihli ve 27605 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik; toprak kirliliğinin önlenmesi, kirlenmiş ya da kirlenme riski taşıyan sahaların belirlenmesi, kayıt altına alınması ve bu sahaların sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda temizlenmesi ile izlenmesine ilişkin teknik ve idari usul-esasları tanımlamaktadır. Arıtma çamuru yönetimi açısından bu mevzuat, toprağa uygulanacak stabilize çamurların olası ağır metal, organik kirletici ve patojen yüklerinin toprağın kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerini olumsuz etkilememesi gerekliliğini vurgular. Böylece, arıtma çamurunun tarımsal amaçlı veya arazi iyileştirme faaliyetlerinde kullanılması hâlinde, toprak kirliliği riskinin izlenmesi, gerektiğinde remediasyon önlemlerinin alınması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması esas kılınmaktadır .

6 Ekim 2010 tarihli ve 27721 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik, her ne kadar arıtma çamuruna özgü doğrudan bir hüküm içermese de, içerdiği teknik ve çevresel gereklilikler doğrultusunda, arıtma çamurunun atık statüsünde yakılmasına ilişkin önemli düzenlemeleri kapsar. Yönetmelik, atıkların yakılması veya birlikte yakılması süreçlerinde uygulanması gereken emisyon limitleri, tesis tasarım kriterleri, işletme koşulları ve çevresel izleme esaslarını belirlemektedir. Bu bağlamda, arıtma çamurunun tek başına ya da diğer atık türleriyle birlikte yakılması durumunda, yönetmelikte tanımlanan teknik gerekliliklere ve çevresel sınır değerlere uyulması zorunludur. Özellikle ısı bertaraf yöntemiyle enerji geri kazanımı planlandığında, arıtma çamurunun yakıt özellikleri

(ısıl değeri, nem oranı, kül içeriği vb.) bu yönetmelik kapsamında değerlendirilir. Dolayısıyla yönetmelik, arıtma çamurunun yakılarak bertaraf edilmesini veya enerji amaçlı kullanımını dolaylı olarak düzenlemektedir.

26 Mart 2010 tarihli ve 27533 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan ‘‘Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik’’, atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde depolanmasına ilişkin esasları belirlemektedir. Yönetmelik, düzenli depolama işlemleri sırasında oluşabilecek sızıntı sularının ve depo gazlarının; toprak, yüzeysel ve yer altı su kaynakları ile hava üzerindeki olumsuz etkilerini asgari düzeye indirmeyi amaçlamakta, bu doğrultuda teknik altyapı şartları, kabul kriterleri ve işletme prosedürlerini detaylandırmaktadır. Arıtma çamurları da bu yönetmelik kapsamındaki atık türleri arasında yer almakta olup, düzenli depolama sahalarına kabul edilmeleri için belirli ön arıtma ve stabilizasyon süreçlerinden geçmiş olmaları gerekmektedir. Ayrıca çamurun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin depolama sahasının sınıfına uygunluk göstermesi zorunludur. Yönetmelik aynı zamanda, depolama sonrası bakım ve izleme yükümlülüklerini tanımlayarak, arıtma çamurlarının düzenli depolama yöntemiyle bertarafında sürdürülebilir çevre yönetimini hedeflemektedir.

Ayrıca yönetmelik, sadece atıkların kabulü ve bertarafına ilişkin değil, aynı zamanda depolama sonrası bakım, kontrol ve izleme yükümlülüklerine de yer vermektedir. Bu yükümlülükler, çamur bertarafının çevresel etkilerinin uzun vadede izlenmesini ve olası risklerin önlenmesini hedeflemektedir.

Bu çerçevede, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, arıtma çamurlarının çevreyle uyumlu şekilde bertaraf edilmesi için mevzuata dayalı bir altyapı ve sürdürülebilir çevre yönetimi yaklaşımı sunmaktadır.

2 Nisan 2015 tarihli ve 29314 sayılı Resmî Gazete ‘de yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği, Türkiye’de atıkların yönetimi ile ilgili temel ve çerçeve düzenlemeleri tanımlayan en kapsamlı mevzuattır. Yönetmelik, atıkların oluşumunun azaltılması, yeniden kullanımı, geri kazanımı, bertarafı ve bu süreçlerin çevreye duyarlı biçimde yönetilmesine yönelik genel esasları kapsamaktadır. Yönetmeliğin Ek-4 bölümünde yer alan Atık Listesinde, "Kentsel Atık suyun Arıtılmasından Kaynaklanan Arıtma Çamurları" 19 08 05 kodu ile tanımlanmakta ve tehlikesiz atık olarak

sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, arıtma çamurunun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile içerdği tehlikeli madde seviyelerinin belirli sınırlar altında kaldığını göstermekte olup, çamurun tarımda kullanım, kompostlaştırma veya düzenli depolama gibi çeşitli bertaraf ve geri kazanım seçeneklerine uygunluğunu yasal çerçevede tanımlamaktadır. Ayrıca yönetmelik, arıtma çamurlarının taşınması, geçici depolanması ve işlenmesi gibi süreçlerde çevre ve insan sağlığı açısından uyulması gereken teknik kuralları da içermektedir.

20 Mart 2010 tarihli ve 27527 sayılı Resmî Gazete ‘de yayımlanan ‘Atık su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği’, yerleşim yerlerinden kaynaklanan atık suların arıtılmasına yönelik tesislerin projelendirilmesi, işletilmesi ve bertaraf süreçlerinin teknik çerçevesini belirlemektedir. Tebliğ, arıtma tesislerinde uygulanacak teknoloji seçiminden tasarım kriterlerine, arıtılmış atık suyun dezenfeksiyonu, yeniden kullanımı ve derin deniz deşarjına kadar geniş bir yelpazede teknik esaslar ortaya koymaktadır. Arıtma sürecinin ayrılmaz bir çıktısı olan arıtma çamurları da bu kapsamda ele alınmakta; çamurun bertarafına ilişkin teknik gereklilikler, nihai bertaraf yönteminin çevresel etkilerinin en aza indirileceği şekilde tanımlanmaktadır. Tebliğ, çamurun miktarının azaltılması, stabilizasyonu, hijyenizasyonu ve nihai bertarafı için kullanılacak yöntemlerin seçiminde çevresel güvenlik, ekonomik uygunluk ve teknolojik yeterlilik gibi kriterlerin göz önünde bulundurulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu yönüyle Tebliğ, arıtma çamurunun yönetiminde mühendislik temelli, sürdürülebilir ve bütüncül bir yaklaşımın temelini oluşturmaktadır.

Türkiye’de arıtma çamurlarının yönetimine ilişkin güçlü bir mevzuat zemini oluşturulmuş durumdadır. Ancak bu çerçevenin uygulanabilirliğini artırmak, yerel kapasiteleri güçlendirmek, teknolojik altyapıyı iyileştirmek ve kamu-özel sektör iş birliğini teşvik etmek gereklidir.

Arıtma çamurlarının yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir atık olarak değil, aynı zamanda potansiyel bir enerji ve organik madde kaynağı olarak değerlendirilmesi; döngüsel ekonomi anlayışı ve çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle tam uyumlu bir politika yaklaşımını yansıtmaktadır. Bu amaçla, Türkiye'nin atık yönetimi stratejilerinde arıtma çamuruna daha fazla yer verilmesi, yeniden kullanım alternatiflerinin teşvik edilmesi ve yerel yönetimlerin teknik/ekonomik olarak

desteklenmesi, gelecekteki çevresel risklerin azaltılmasına önemli katkı sağlayacaktır.

2.2 AB Mevzuatı

Avrupa Birliği'nin (AB) atık yönetimine ilişkin politikalarının temelini oluşturan ilk resmi belge, "Komisyon Tebliği" olarak yayımlanan Atık Yönetimine Dair Topluluk Stratejisi'dir. Bu strateji, atık oluşumunun önlenmesi, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım gibi ilkeleri ön plana çıkaran hiyerarşik bir yaklaşım benimseyerek AB çapında sürdürülebilir bir atık yönetim sisteminin kurulmasına zemin hazırlamıştır. AB mevzuatının çerçevesini belirleyen temel düzenleme ise, 2008 yılında kabul edilen Atık Çerçeve Direktifi'dir (Directive 2008/98/EC). Bu direktif, atığın tanımı, sınıflandırılması, yönetim ilkeleri ve atık hiyerarşisini içermekte olup, üye devletlere atık yönetim planları ve programları oluşturma yükümlülüğü getirmektedir (European Parliament ve Council, 2008).

Avrupa Birliği'nin arıtma çamurlarına ilişkin özel düzenlemesi olan Arıtma Çamuru Direktifi (86/278/EEC), bu çamurların tarımsal amaçla kullanımını çevresel ve insan sağlığı açısından güvenli hale getirmeyi amaçlamakta ve ağır metal içerikleri ile ilgili sınır değerler getirmektedir. Düzenli Depolama Direktifi (1999/31/EC), atıkların çevreye zarar vermeden düzenli depolanmasına ilişkin teknik gereklilikleri ve sınırlamaları belirlemektedir. Atıkların Taşınımı Direktifi (EC/1013/2006), atıkların sınır ötesi taşınmasına yönelik kuralları ve izin süreçlerini düzenlerken; Endüstriyel Emisyonlar Direktifi (2010/75/EU), endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan emisyonların kontrol altına alınmasını ve entegre kirlilik önleme ve kontrol (IPPC) yaklaşımını benimsemektedir (European Council, 1986; European Council, 1999; European Parliament ve Council, 2006, 2010). Tüm bu düzenlemeler, Avrupa Birliği'nin çevre politikaları kapsamında, özellikle atık yönetimi ve arıtma çamurlarının bertarafı konularında çevreye duyarlı, sürdürülebilir ve izlenebilir sistemlerin kurulmasını hedeflemektedir.

Avrupa Birliği'nin çevre politikaları kapsamında önemli yer tutan Kentsel Atık Su Arıtma Direktifi (91/271/EEC), 1991 yılında kabul edilmiştir. Direktifin temel amacı, kentsel atık su ve belirli endüstriyel atık suların alıcı ortamlara deşarj edilmesinden kaynaklanan çevresel etkileri azaltmak ve su kaynaklarının

korunmasını sağlamaktır. Bu düzenleme, özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde uygun atık su toplama ve arıtma sistemlerinin kurulmasını zorunlu kılarken, arıtılmış suyun belirlenen kalite kriterlerine uygun şekilde deşarj edilmesini şart koşmaktadır.

Direktifin öne çıkan maddelerinden biri olan 14. madde, arıtma süreci sonucu elde edilen çamurun mümkün olduğunca yeniden kullanılmasını hedeflemekte ve bertaraf yöntemlerinin çevresel etkilerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, arıtma çamurunun tarımsal amaçlı kullanımının teşvik edilmesi; ancak bu kullanımın çevre ve insan sağlığı açısından güvenli koşullar altında gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu hüküm, sürdürülebilir atık yönetimi anlayışına uygun olarak, arıtma çamurunun faydalı kullanım potansiyelinin değerlendirilmesini ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanmasını hedeflemektedir.

Ayrıca, Su Çerçeve Direktifi (2000/60/EC) ile doğrudan ilişkilendirilerek, su kaynaklarının korunması açısından atık su yönetiminin entegre bir yapıda ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu çerçevede, Kentsel Atık Su Arıtma Direktifi (91/271/EEC), hem teknik hem de çevresel gereklilikler doğrultusunda, arıtma çamurlarının kontrollü bir şekilde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Arıtma Çamuru Direktifi (86/278/EEC), arıtma çamurunun tarımda uygulanmasını teşvik etmek ve toprak, bitki örtüsü, hayvanlar ve insanlar üzerinde zararlı etkiler yaratmayacak şekilde kullanımını düzenlemek amacıyla yaklaşık otuz yıl önce kabul edilmiştir (Özen, 2023). Bu kapsamda, çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde toprağa enjekte edilmediği sürece arıtılmamış çamurun tarım arazilerinde kullanımı yasaklanmaktadır. Arıtılmış çamur ise, ham çamurun kullanımından kaynaklanan sağlık tehlikelerini ve fermente edilebilirliğini önemli ölçüde azaltmak için biyolojik, kimyasal veya ısıtma işlemi, uzun süreli depolama ya da diğer uygun yöntemlerle stabilize edilmiş çamur olarak tanımlanmaktadır. (Council of the European Communities, 1986).

Arıtma Çamuru Direktifi (86/278/EEC), arıtma çamurundaki patojenlerden kaynaklanabilecek sağlık risklerine karşı koruma sağlamak amacıyla, meyve ve sebze mahsullerinin yetiştirildiği toprağa hasattan en az 10 ay öncesinde arıtma çamuru uygulanmasına izin vermektedir. Mera ve otlak gibi alanlara uygulama durumunda ise hayvanların bu alanlara ancak çamur uygulamasından en az üç hafta

sonra girmelerine izin verilmektedir (Özen, 2023). Direktif, ayrıca arıtma çamurunun yalnızca bitkilerin besin maddesi gereksinimlerine uygun şekilde ve yüzey ile yer altı suyu kalitesini bozmayacak biçimde kullanımına olanak tanımaktadır.

Buna ek olarak, direktif arıtma çamuru ve toprakların örneklenmesi ve analizine dair kurallar belirlemekte; üretilen arıtma çamuru miktarı, uygulanan miktar, çamurun bileşimi ve özellikleri, kullanılan arıtma yöntemi, çamur kullanıcılarının kimlik bilgileri ile birlikte kullanım alanlarının kayıt altına alınmasını zorunlu kılmaktadır (Council of the European Communities, 1986).

Avrupa Birliği'nin atık yönetimi politikaları içerisinde önemli bir yer tutan Düzenli Depolama Direktifi (1999/31/EC), atıkların düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmesinden kaynaklanan çevresel etkilerin en aza indirilmesini hedeflemektedir. Direktif, özellikle biyolojik olarak parçalanabilir (biyobozunur) atıkların düzenli depolama sahalarına gönderilmesinin sınırlandırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, yüksek organik madde içeriği nedeniyle arıtma çamurları da biyobozunur atık kategorisinde değerlendirilmekte ve söz konusu direktifin kapsamına girmektedir.

Direktifin 2. maddesinin (m) bendinde biyobozunur atık; “gıda ve bahçe atıkları ile kâğıt ve karton gibi anaerobik veya aerobik ayrışmaya uğrayabilen atıklar” olarak tanımlanmıştır. Bu tanım çerçevesinde stabilize edilmemiş veya ön işlem görmemiş arıtma çamurlarının düzenli depolama alanlarına kabulü; metan gazı oluşumu gibi sera gazı salımlarına ve sızıntı suyu kaynaklı toprak ile yer altı suyu kirliliğine neden olabileceğinden, önemli çevresel riskler barındırmaktadır (Council of the European Union, 1999).

Bu nedenle, Direktif; biyobozunur atıkların düzenli depolanmasının aşamalı olarak azaltılmasına yönelik bağlayıcı hedefler koymakta, ön arıtma (örneğin kurutma, kompostlama, stabilizasyon) yapılmadan bu tür atıkların depolanmasına kısıtlamalar getirmektedir. Bu durum, arıtma çamurlarının nihai bertaraf öncesinde ön işleme tabi tutulmasını, özellikle organik içeriğin azaltılmasını ve çevresel güvenliğin sağlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Arıtma amurunun düzenli depolama yoluyla bertarafı, bu bağlamda ancak alternatif bertaraf veya geri kazanım yöntemlerinin uygun olmadığı durumlarda ve çevresel kriterlere tam uyum sağlanması hâlinde mümkün olabilmektedir. Bu düzenleme, Avrupa Birliği'nin atık hiyerarşisine uygun şekilde, çamurun öncelikle azaltılması, yeniden kullanımı veya enerji geri kazanımı yoluyla değerlendirilmesini teşvik eden yaklaşımını yansıtmaktadır (Elibol, 2021).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, betimsel analiz ve değerlendirme yöntemine dayalı olarak yürütülmüştür. Araştırma kapsamında, Niksar Belediyesi tarafından Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu - Marmara Araştırma Merkezine (TÜBİTAK MAM) yaptırılan analizlere ait stabilize arıtma çamuru numuneleri değerlendirilmiştir. Arıtma çamurlarının mevcut durumu, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri ile birlikte bertaraf ve yeniden kullanım alternatifleri; saha verileri, belediye tarafından yaptırılan laboratuvar analiz sonuçları ve mevzuat karşılaştırmaları temelinde değerlendirilmiştir. Uygulanan analiz yöntemleri, ilgili yönetmeliklerde belirtilen TS EN, EPA ve ISO gibi ulusal ve uluslararası standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Veri toplama sürecinde iki ayrı laboratuvar analiz raporu kullanılmıştır:

- Rapor No: 82080155-125.05-4655/39807 – TÜBİTAK MAM tarafından hazırlanmış olup, arıtma çamurunun fizikokimyasal özellikleri, ağır metal içeriği, organik kirleticiler ve toksisite testlerine yönelik analizleri kapsamaktadır.
- Rapor No: 29109288-125.05-4907/31949 –TÜBİTAK MAM tarafından düzenlenmiş bu analiz raporu, Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik çerçevesinde, çamurun tarımda kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla yapılmış parametre analizlerini içermektedir.

Toplanan veriler, Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek 3/B, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Ek-2 ve Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik'te belirtilen sınır değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiş; böylece çamurun yeniden kullanım potansiyeli ve bertaraf senaryolarına uygunluğu bilimsel olarak analiz edilmiştir.

3.1 Tesis Bilgileri

3.1.1 Niksar atık su arıtma tesisi işletme bilgileri

Tokat İli, Niksar İlçesi, Bahçelievler Mahallesi Elvan Sokak No:15 adresinde, tapuda İsmetpaşa Mahallesi, pafta 49, ada 79, parsel numarasında kayıtlı olan 22.161,60 m² yüzölçümüne sahip taşınmaz üzerinde, 5.199,37 m² kapalı alanda faaliyet gösteren atık su arıtma tesisi yer almaktadır. Söz konusu tesis, Niksar ilçesindeki evsel nitelikli atık suların arıtılmasını amaçlamakta olup, günlük 12.177 m³ kapasiteli, azot ve fosfor giderimli, solar kurutmalı ileri biyolojik arıtım teknolojisine sahiptir.

3.1.2 Evsel nitelikli atık suların arıtılması faaliyeti

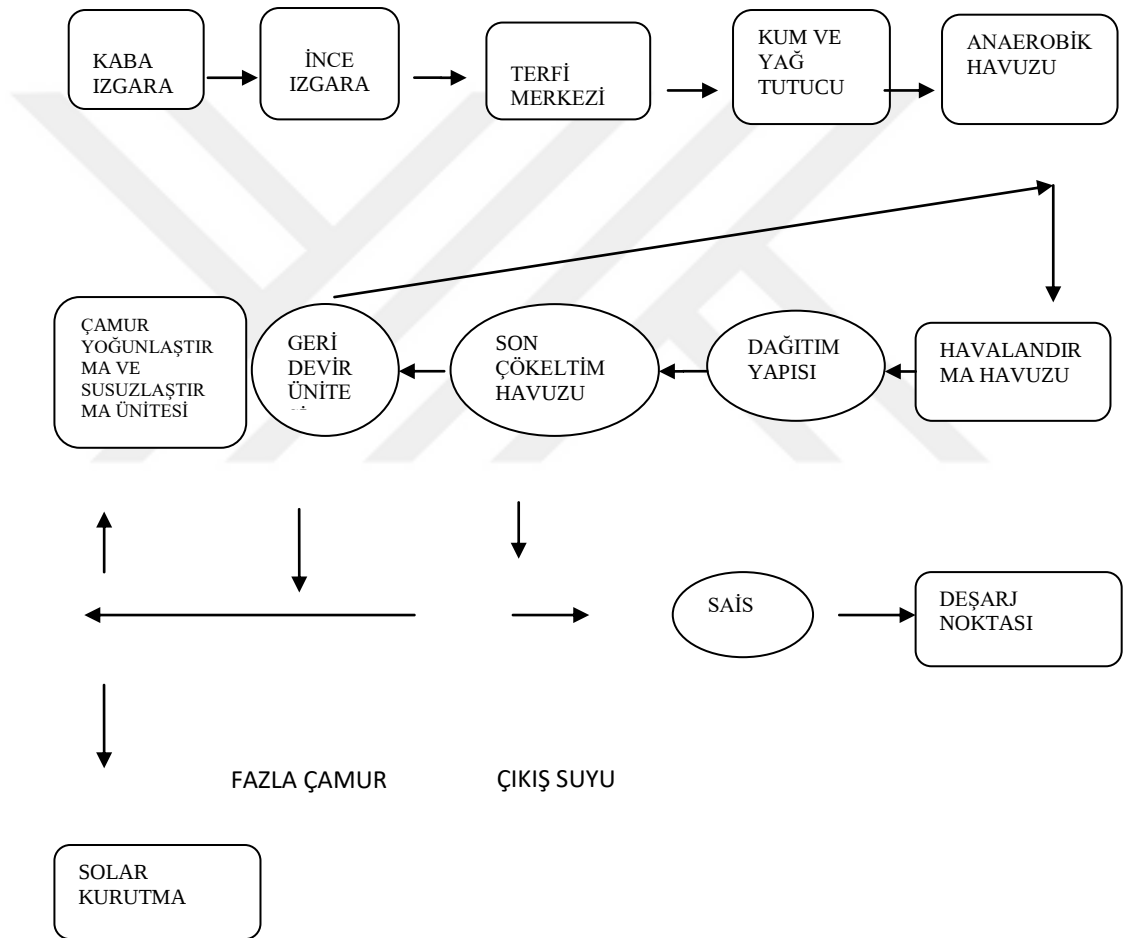
Niksar Atık su Arıtma Tesisi, Niksar ilçesinin altyapı projeleri içerisinde çevre sağlığı ve sürdürülebilir su yönetimi açısından en önemli yatırımlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu proje, çevrenin korunması, su kaynaklarının kirlenmesinin önlenmesi ve toplum sağlığının güvence altına alınması adına atılmış stratejik bir adımdır.

Tesisin inşası, Tokat ili Niksar ilçesinden kanalizasyon şebekesi aracılığıyla toplanan atık suların, Yeşilirmak'ın bir kolu olan Kelkit Nehri'ne doğrudan karışmasını önlemek amacıyla planlanmış ve biyolojik arıtma teknolojisi esas alınarak tasarlanmıştır.

Niksar Atık su Arıtma Tesisi'nin ilk aşaması, 2032 yılı projeksiyonuna göre yaklaşık 48.013 eşdeğer nüfusa hizmet verecek şekilde, ikinci aşaması ise 2047 yılı için öngörülen 54.698 eşdeğer nüfusa göre dizayn edilmiştir. Tesisin tasarımında, Almanya kökenli ATV-A 131 standartları esas alınmış ve karbon, azot ve fosfor giderimini birlikte sağlayan A2O (Anaerobik-Anoksik-Oksik) prosesi tercih edilmiştir. Deşarj standartları ise Avrupa Birliği normlarına uyumlu olacak biçimde belirlenmiştir.

Tesiste hem birinci hem de ikinci aşamada kullanılan proses tipi, “Uzun Havalandırılmalı Aktif Çamur Sistemi”dir. Bu sistemin fiziksel arıtma aşamasında; kaba ve ince ızgaralar, kum ve yağ tutucular gibi ön arıtma üniteleri sayesinde atık su içindeki yüzen maddeler, çökelebilir katı maddeler, kum, yağ ve gres gibi fiziksel

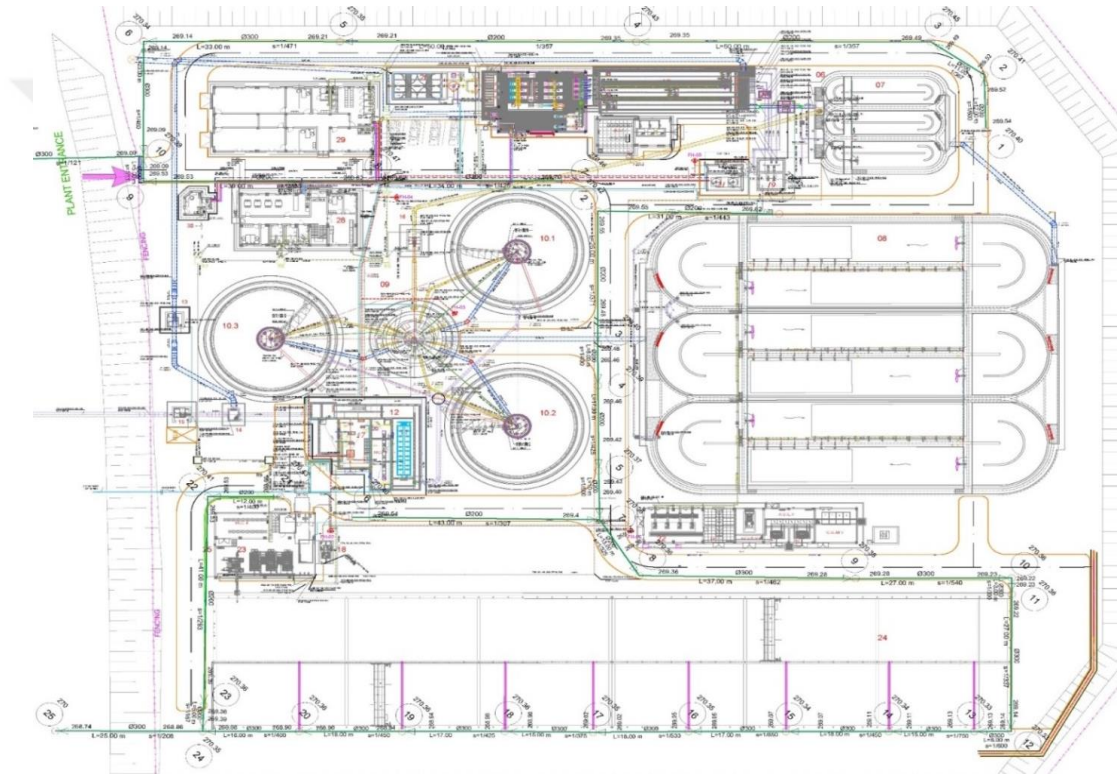
kirleticiler uzaklaştırılarak biyolojik arıtmaya uygun bir ortam oluşturulmaktadır. Biyolojik arıtma ünitesinde ise, atık suda çözünmüş halde bulunan organik maddeler mikroorganizmalar aracılığıyla oksidasyon ve sentez süreçlerinden geçirilerek CO₂, H₂O, NO₃⁻ ve SO₄²⁻ gibi stabil son ürünlere dönüştürülmektedir. Sistem performansı, aktif çamur içerisindeki flok yoğunluğunun ve çamur yaşının optimum aralıkta tutulması ile sağlanmaktadır. Şekil 3.1’de Niksar Atık su Arıtma Tesisi genel yerleşim planı verilmiştir.



Şekil 3.1. Genel yerleşim planı (Niksar Belediyesi, 2024).

3.1.3 Vaziyet planları, iş akım şemaları ve proses özetleri

Niksar Belediyesi Atık su Arıtma Tesisi, Tokat ili Niksar ilçesinde yer almakta olup 12.177 m³/gün kapasiteli olarak projelendirilmiştir. Tesis, Yeşilirmak Havzası'na hizmet vermek üzere, yerleşim alanlarına ve tarım arazilerine yakın bir konumda kurulmuştur. Tesis yerleşiminde ön arıtma ünitesi, biyolojik arıtma havuzları, çökeltim havuzları, çamur susuzlaştırma ünitesi, solar kurutma alanı ve idari bina yer almaktadır. Vaziyet planı, tüm bu ünitelerin mekânsal dağılımını göstermektedir. Şekil 3.2 'de arıtma tesisinin vaziyet planı verilmiştir.



Şekil 3.2. Vaziyet planı (Niksar Belediyesi, 2024).

3.1.3.1 Giriş Yapısı (İnce Kaba Izgara-Kum Yağ Tutucu-Terfi Pompaları)

Atık su, 1000 mm çapında cazibeli iletim hattı ile arıtma tesisi sahasındaki son röğara 265,64 m kotunda ulaşmaktadır. Bu noktadan itibaren cazibe ile akış devam ederek, sırasıyla R1 röğarına 265,43 m kotunda ve ardından R2 röğarına 265,33 m kotunda iletilmektedir. R2 röğarından sonra atık su, yine 1000 mm çapındaki cazibeli hat üzerinden giriş yapısına 265,28 m kotunda ulaşmaktadır.

Giriş yapısı ve taş tutucu ünitesi, atık suyun sahip olduğu kinetik enerjiyi azaltmak amacıyla, basınç ve hızı düşürecek şekilde tasarlanmıştır. Bu yapının girişinde bir adet aktuatörlü kapak yer almakta olup, kapak kontrolü taş tutucu ünitesi içerisinde bulunan ultrasonik seviye sensörü aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu düzenleme, sistemin otomatik ve güvenli çalışmasını temin etmektedir.

Taş kapanı ünitesi, kanalizasyon sisteminden gelen büyük boyutlu taş, kaya gibi katı atıkların arıtma tesisine ulaşmadan sistemden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Ünitenin haznesinde çökelen iri partiküller, klemşel kepçe vasıtasıyla dışarı alınmakta ve doğrudan konteyner veya kamyonlara yüklenerak bertaraf edilmektedir.

Arıtma tesisi girişinde, çubuk aralığı 20 mm ve çubuk genişliği 10 mm olan otomatik temizlemeli kaba ızgara sistemi kullanılmaktadır. Her ızgara, kendi mekanik tarak ünitesi ile donatılmış olup, ızgarada biriken atıkları otomatik olarak sıyrarak temizlemektedir. Tarak ünitesinin çalışması, ızgara öncesi ve sonrası yerleştirilen ultrasonik seviye sensörleri ile izlenmekte, sensörler arasında tanımlanmış seviye farkı oluştuğunda temizleme işlemi otomatik olarak başlatılmaktadır.

Her bir ızgara hattının giriş ve çıkışında bulunan kapaklar sayesinde ızgaralar kademeli olarak devre dışı bırakılabilmekte ve bu sayede bakım veya arıza durumlarında sistem kesintiye uğramadan müdahale imkânı sağlanmaktadır.

Izgara ünitesinde toplanan atıklar bant konveyör ile çöp konteynerine aktarılmakta ve katı atık olarak sistemden uzaklaştırılmaktadır.

İnce ızgara ünitesi, arıtma tesisine gelen atık sudaki 6 mm'den büyük katı maddelerin tutulması amacıyla kullanılmakta olup, tesisin diğer ünitelerinde bulunan mekanik ekipmanların korunması ve arıtma verimliliğinin artırılması açısından kritik bir ön işleme ünitesidir. Bu üniteye perfore tip ince ızgaralar tercih edilmiştir. Delikli yapıya sahip bu ızgaralar, katı maddelerin etkin şekilde ayrılmasını sağlar.

Her bir ızgara, mekanik temizleme ünitesi ile donatılmış olup, ızgaraların kirlenme durumuna göre otomatik yıkama nozulları aracılığıyla temizlenmektedir. Temizleme işlemi, ızgara kanalının giriş ve çıkışına yerleştirilen ultrasonik seviye sensörleri ile belirlenen fark seviye esasına dayanarak başlatılmakta, ayrıca sistemin belirli zaman aralıklarında zaman kontrollü olarak da çalışması sağlanmaktadır.

İzgara sisteminde, giriş ve çıkış noktalarında bulunan motorlu kapaklar yardımıyla ünitelerin paralel çalışması mümkün kılınmakta, herhangi bir bakım veya arıza durumunda yedek ızgaranın devreye alınması sağlanmaktadır. Bu durum işletme sürekliliği açısından büyük avantaj sunmaktadır.

İnce ızgarada tutulan katı maddeler, helezon konveyörler aracılığıyla ızgara presine taşınmakta, burada yapılan mekanik sıkma işlemi ile katı maddelerin nem oranı %40–50 düzeylerine düşürülmektedir. Preslenen atıklar, sızdırmaz konteynerlerde toplanarak bertaraf edilmek üzere tesisten uzaklaştırılmaktadır.

İnce ızgara kanalından sonra gelen atık su, giriş pompa istasyonuna dökülmekte ve burada tesisin ileri arıtma ünitelerine iletilmesi sağlanmaktadır. Giriş pompa istasyonunda, atık suyun kum ve yağ tutucu ünitesine transferi, dalgıç tip pompalar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Pompa istasyonu, atık suyun seviyesine duyarlı bir şekilde çalışan ultrasonik seviye sensörleri ile donatılmıştır. Bu sensörler sayesinde pompalar, belirlenen maksimum ve minimum seviye aralıklarında sıralı olarak devreye girmekte ve otomatik olarak çalışmaktadır. Ayrıca, sistemde tanımlanan alarm seviyesi aşıldığında, taş kapanı girişinde bulunan kapak kapatılarak tankta oluşabilecek olası taşmaların önüne geçilmektedir.

Pompa sisteminin işletimi, PLC (Programlanabilir Lojik Kontrol) sistemi üzerinden tam otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Pompaların çıkışına entegre edilen hız kontrol cihazları sayesinde, istenilen debi değerine göre hassas ayarlamalar yapılabilmekte, bu da sistemin enerji verimliliğini ve hidrolik performansını artırmaktadır.

Ayrıca pompaların eş yaşlandırma sistemi ile kontrol edilmesi, her bir pompanın eşit sürelerde çalışmasını sağlayarak ekipman ömrünün uzatılmasına ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

3.1.3.2 Kum ve yağ tutucu tankı

Tesis girişinde yer alan 3 adet paralel havalandırmalı kum ve yağ tutucu ünitesi, atık sudaki taneli inorganik maddelerin ve yüzeysel yağların ayrıştırılması amacıyla tasarlanmıştır. Bu ünitelerde, taneli yapıdaki inorganik maddeler (kum vb.), tankın alt kısmına doğru çökerek birirmektedir. Kumun çökmesini desteklemek amacıyla havuzlara blower sistemiyle hava verilmekte, böylece çözünmüş oksijen seviyesi yükseltilerek yağların yüzeyde toplanması da sağlanmaktadır.

Kum tutucuların yüzeyinde doğrusal tip sıyrıcılar hareket etmektedir. Sıyrıcı köprü üzerine monte edilen dalgıç pompa yardımıyla tankın dibinde biriken sulu kum karışımını toplama kanalına aktarmaktadır. 3 adet havalandırmalı ünite için 2 adet toplama kanalı inşa edilmiş olup, bu kanallar birbirine bağlıdır. Toplanan sulu kum karışımı, ızgara binası içinde yer alan 2 adet paralel çalışan kum ayırıcı ünitesine yönlendirilmekte, burada kum sudan ayrılarak katı atık olarak bertaraf edilmektedir.

Yüzeyde biriken yağ ve köpük gibi maddeler, sıyrıcı vasıtasıyla yağ toplama haznelere alınmakta, ardından bu malzeme ızgara binasında bulunan tambur ızgaraya aktarılmaktadır. Tambur ızgarada yağ ve köpük atıkları ızgaralanmakta ve daha sonra ızgara presine yönlendirilerek, ince ızgara atıkları ile birlikte bertaraf edilmektedir.

Havalandırma ihtiyacı, 2+1 adet (2 aktif, 1 yedek) blower sistemi ile sağlanmaktadır. Sıyrıcı sistemleri zaman kontrollü olarak çalışmakta olup, her ünitenin kendi lokal kontrol panosu mevcuttur. Bu panolardan alınan veriler, merkezi SCADA sistemine aktarılmakta ve uzaktan izleme/kontrol sağlanmaktadır. Sıyrıcı sistemleri, çelik ray üzerinde hareket eden tekerlekli doğrusal tipte tasarlanmıştır.

3.1.3.3 Anaerobik bio fosfor ünitesi

Fiziksel arıtma aşamasını takiben, atık su içerisindeki fosforun giderilmesi amacıyla atık su anaerobik biyofosfor ünitesine alınmaktadır. Bu ünite, anaerobik ortamda gerçekleşen fermentasyon süreci ile atık su içerisindeki fosfor, serbest hale getirilmekte ve daha sonra aerobik ortamda fosfor tutucu bakteriler (PAO - Fosfat Akümüle Eden Organizmalar) tarafından kullanılabilir forma dönüştürülmektedir.

Anaerobik ünite de fosforun serbestleşmesi ile aerobik ünite de biyolojik olarak uzaklaştırılması sağlanmakta ve bu sayede çamurla birlikte ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Böylelikle, kimyasal çökeltmeye gerek kalmadan, biyolojik yollarla fosfor giderimi gerçekleştirilmiş olur.

Her bir anaerobik tank içerisinde, aktif çamurun çökmesini engellemek amacıyla dalgıç tip karıştırıcılar yer almaktadır. Bu karıştırıcılar tank içerisindeki homojenliği sağlamakta ve anaerobik koşulların sürekliliğini desteklemektedir.

Ayrıca, bakteriyel aktivitenin sürdürülmesi ve prosesin verimliliğinin artırılması amacıyla, karbon kaynağı ihtiyacını karşılamak için tanka geri devirli çamur transferi yapılmaktadır. Geri devir işlemi, hem karbon kaynağı sağlamakta hem de sistemdeki biyolojik yükü dengelemeye yardımcı olmaktadır.

3.1.3.4 Havalandırma ünitesi (aktif çamur tankı)

Tesiste biyolojik arıtmanın temel ünitesi olarak 3 adet aktif çamur tankı inşa edilmiştir. Her bir tank, anoksik (oksijensiz) ve oksik (havalandırılmalı) bölümlerden oluşmakta olup, karbon, azot ve fosfor gibi kirleticilerin biyolojik olarak giderimini sağlamaktadır.

Biyolojik arıtmanın temel prensibi, fiziksel yöntemlerle uzaklaştırılamayan organik maddelerin, mikroorganizmalar (aktif çamur) aracılığıyla parçalanması ve daha sonra çökeltme havuzlarında çökeltilerek sistemden uzaklaştırılmasıdır. Bu işlem sırasında atık su içerisindeki çözünmüş organik maddeler, mikroorganizmalar tarafından metabolize edilerek biyokütle ye dönüştürülür.

Oksik (havalandırılmalı) bölümlerde, mikroorganizmalar bol oksijen altında organik kirleticileri ayrıştırırken, anoksik (oksijensiz) bölümlerde ise denitrifikasyon reaksiyonları gerçekleşmekte; bu sayede azot bileşikleri nitrat formundan azot gazına dönüştürülerek ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Fosfor giderimi ise önceden anaerobik fazda serbestleşen fosforun, oksik bölgede fosfor tutucu bakteriler tarafından depolanması ile sağlanmaktadır.

Bu süreçlerin verimli şekilde gerçekleşebilmesi için aktif çamur tanklarında sürekli oksijen temini ve karıştırma gereklidir. Havalandırma ve karıştırma sistemleri, hem

mikroorganizmaların etkinliğini artırmakta hem de tank içerisindeki homojenliği sağlamaktadır.

Arıtma tesisinde biyolojik arıtma işlemi, havalandırma tankında gerçekleştirilmektedir. Bu ünite, atık su içerisindeki çözünmüş ve kolloidal organik maddeler, mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanmakta ve stabilize edilmektedir. Havalandırma sistemi, gerekli çözünmüş oksijen seviyesini sağlayarak mikroorganizmaların metabolik faaliyetlerini desteklemektedir.

Havalandırma tankı, tam karışım akım prensibine göre tasarlanmıştır. İçerisinde yer alan difüzör sistemleri veya yüzeysel havalandırıcılar ile atık suya oksijen transferi sağlanmakta ve tank içerisinde homojen bir karışım elde edilmektedir. Sistemde yer alan iç geri devir pompası, son çökeltim havuzundan gelen aktif çamurun bir kısmını yeniden havalandırma tankına ileterek biyolojik arıtım sürecinin sürekliliğini sağlamaktadır.

Havalandırma süreci, genellikle Çözünmüş Oksijen (ÇO) sensörleri ve amonyum/nitrat ölçüm ekipmanları ile izlenmekte ve otomatik kontrol sistemleri aracılığıyla optimize edilmektedir. Bu sayede hem enerji verimliliği artırılmakta hem de istenilen arıtma verimi sağlanmaktadır.

3.1.3.5 Son çökeltme tankı, dağıtım yapısı ve geri devir

Dağıtım yapısında toplanan atık sular, 3 adet son çökeltme tankına eşit debi ile verilmektedir. Tankların girişinde bulanık kapaklar vasıtasıyla çökeltme tankları işletmesi sağlanabilmektedir.

Dağıtım yapısı kompakt bir yapı olup, son çökeltme tankları giriş-çıkış, çamur geri devir terfi merkezi, fazla çamur terfi merkezi ve köpük toplama yapısı olarak kullanılmaktadır.

Son çökeltme tankının başlıca görevi, aktif çamur tankında oluşturulan çamur halindeki biyoaktif kütlenin çökelttilerek su fazından ayrılmasını sağlamak ve böylece atık su giriş kirlilik parametrelerinde çok düşük konsantrasyonlara sahip bir arıtılmış su üretmektir.

Aktif çamur prosesinden sonra, son çökeltme tankının iki önemli görevi vardır.

1. Çok ince askıda katı maddeleri çökeltmek ve deşarj standartlarına uygun çıkış suyu elde etmek.
2. Biyolojik arıtma ünitelerine geri dönüş için gerekli aktif çamuru temin etmek ve bir dereceye kadar yoğunlaştırmak.

Dairesel olarak 3 adet çökeltme tasarlanmıştır. Dağıtım yapısından eşit debi ile her bir çökeltme tankının orta kısmında yer alan deflektöre atık su girişi yapılmaktadır. Çökeltme ünitesinde aktif çamur tankından gelen biyoaktif kütle çökelererek atık sudan ayrılması gerçekleştirilir. Son çökeltme tanklarının verimi, bekletme süresi, yüzeysel yükleme ve katı madde yükleme parametreleriyle takip edilmektedir.

Son çökeltme tankı yüzey sıyrıcısına monte edilen burgular ile toplanan köpük, yağ vs. yüzen katı maddeler, yine sıyrıcıya monte edilen köpük haznesine ve buradan da köpük pompası ile fazla çamur pompa istasyonuna basılmaktadır.

Son çökeltme tankından savaklanan arıtma işlemlerini tamamlamış arıtılmış su son çökeltme çıkış yapısına geçerek sulama amaçlı kullanım için filtrasyon ve dezenfeksiyon sistemine gönderilmektedir.

Çökeltme tankı tabanından alınan çamur, dağıtım yapısındaki çamur bölümüne yerçekimi ile alındıktan sonra geri devir (RAS) pompa istasyonunda bulunan ve her bir çökeltme için ayrı dizayn edilmiş pompa istasyonunda bulunan RAS pompaları ile geri devir transfer tankına basılmaktadır. Dağıtım yapısının en dış bölümü olarak dizayn edilmiştir. Dairesel bir kanal olarak bu havuzda birleşen geri devir çamuru çıkışta debi ölçümü yapıldıktan sonra anaerobik fosfor giderme tankı girişine alınır.

Geri devirin amacı biyolojik arıtma için gerekli ve havuzlardaki biyokütlenin azalmasını engellemek için aşırı çamuru sağlamaktır. 3 asıl + 1 yedek olmak üzere dalgıç geri devir pompası yer almaktadır. Geri devir terfi pompaları ultrasonik seviye kontrol sistemine bağlı olarak çalışmaktadır.

3.1.3.6 Çamur susuzlaştırma binası mekanik belt –dekantör

Son çökeltme tanklarından alınan fazla çamur, fazla çamur terfi istasyonunda bulunan pompalar aracılığıyla mekanik bantlı yoğunlaştırıcı ünitesine iletilmektedir.

Burada, yaklaşık %0,8–1 katı madde konsantrasyonuna sahip çamura polielektrolit dozlaması uygulanarak çamurun yoğunlaştırılması sağlanmakta ve %4–6 oranında katı madde içeriğine ulaştırılmaktadır (Kalkan, 2010). Yoğunlaştırma işlemi sonrası çamur, yoğunlaştırılmış çamur rezerv tankına aktarılır.

Çamurun susuzlaştırılması işlemi, santrifüj dekantör tipi susuzlaştırma ekipmanı ile gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada, önceden yoğunlaştırılmış olan çamur tekrar polielektrolit dozlamasına tabi tutulur, zira polimer desteği olmadan susuzlaştırma işleminin verimliliği düşmektedir. Dekantör ünitesinde gerçekleştirilen santrifüjleme sonucunda çamurun katı madde içeriği %22–25 seviyesine çıkarılır.

Susuzlaştırılmış çamur, prosesin devamında ya solar çamur kurutma ünitesine yönlendirilmekte ya da çamur keki depolama ünitesine alınmaktadır. Bu süreçler, arıtma çamurunun nihai bertaraf veya geri kazanım yöntemlerine hazırlanmasında önemli bir basamak teşkil etmektedir.

3.1.3.7 Solar kurutma ünitesi (çamur kurutma ünitesi)

Arıtma tesisinde susuzlaştırılmış çamurun kuru madde içeriğini artırmak, daha ileri düzeyde sterilizasyon sağlamak ve nihai bertaraf öncesinde çamurun hacmini azaltarak depolama kapasitesini artırmak amacıyla solar çamur kurutma ünitesi tasarlanmıştır.

%22–25 katı madde oranına sahip susuzlaştırılmış çamur, bantlı konveyör sistemi ile solar kurutma hollerine aktarılmaktadır. Bu üniteye çamur, kurutularak %90 kuru madde içeriğine ulaşacak şekilde işlenmektedir. Solar kurutma sistemi, iklim kontrollü havalandırma sistemleri ve otomatik çamur döndürme-taşıma ekipmanları ile donatılmıştır. Böylece homojen kuruma sağlanmakta, çamur içerisindeki nem doğal güneş enerjisi ve destekleyici sistemler yardımıyla uzaklaştırılmaktadır.

Solar kurutma yapıları iki ayrı hol binasından oluşmakta olup, her biri belirli kapasitede çamuru işleyebilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Kurutma işlemi sonunda elde edilen yüksek kuru madde içerikli çamur, nihai bertaraf için çamur keki depolama alanına veya alternatif bertaraf yöntemlerine yönlendirilmektedir.

Solar kurutma ünitesinden çıkan ve %90'a kadar kuru madde içeriğine ulaşan çamur, nihai bertaraf öncesinde belirli bir süre geçici olarak çamur keki depolama alanında muhafaza edilmektedir. Bu alanlar, sızdırmaz beton zemin üzerine inşa edilmiş, sızma ve taşkın riskine karşı gerekli çevresel koruma önlemleri alınmış tesis bölümleridir.

3.1.3.8 Blower

Atık su arıtma tesisinde biyolojik arıtma ünitesi kapsamında yer alan nitrifikasyon/denitrifikasyon tanklarında, karışık sıvı süspansiyonu (MLSS), sırasıyla anoksik ve oksik koşullara maruz bırakılarak azot giderimi sağlanmaktadır. Bu süreçte, anoksik tanklarda oksijensiz ortamda denitrifikasyon gerçekleşirken, oksik tanklarda verilen çözülmüş oksijen (DO) ile nitrifikasyon sağlanmaktadır.

Tesisin havalandırma sistemi, yüksek verimli turbo blowerlar ve membran difüzörler ile donatılmıştır. Bu sistem, düşük enerji tüketimi ile yüksek çözülmüş oksijen transfer verimliliği sağlamak ve birim kg O₂ başına düşen enerji maliyetini minimize etmektedir.

Blower sistemi 3 adet esas ve 1 adet yedek olmak üzere toplam 4 adet turbo blower ünitesinden oluşmaktadır. Her bir blower, oksijen metre (DO sensörü) ile sürekli izlenen çözülmüş oksijen değerlerine bağlı olarak çalışmakta ve PLC kontrollü frekans invertörü sayesinde istenilen debide hava sağlanmaktadır.

Oksik tanklarda hedeflenen çözülmüş oksijen konsantrasyonu 2 mg/L olarak belirlenmiştir. Oksijen konsantrasyonu bu değerin üzerine çıktığında, PLC komutu ile blower ünitesi düşük devirde çalışarak hava beslemesini azaltmakta; tersi durumda ise devir artırılarak çözülmüş oksijen seviyesi dengelenmektedir. Bu yöntemle hem enerji verimliliği artırılmakta hem de mikrobiyolojik aktivitenin stabil bir ortamda gerçekleşmesi sağlanmaktadır.

Difüzör sistemleri tank tabanına eşit dağılımlı olarak yerleştirilmiş olup, hava kabarcıklarının etkin biçimde dağılması sayesinde oksijen transferi maksimize edilmiştir. Bu sistem, aktif çamur sürecinin verimliliğini artırmakla birlikte, atık suyun istenen arıtım parametrelerine ulaşmasında kilit rol oynamaktadır.

3.1.3.9 Uv dezenfeksiyon mikrodisk filtre ve hidrofor binası

Son çöktürme tanklarından savaklanarak alınan arıtılmış su, deşarj öncesinde mikrodisk filtrasyon ve ultraviyole (UV) dezenfeksiyon ünitesinden geçirilerek ileri arıtma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu proses sayesinde, hem çıkış suyunun kalitesi artırılmakta hem de dezenfeksiyon aşamasında ihtiyaç duyulan dozaj miktarı optimize edilmektedir.

Mikrodisk Filtrasyon Sistemi, kompakt yapısı sayesinde küçük bir alanda geniş bir filtre yüzeyi sağlayan, mekanik ve kendi kendini temizleyen bir sistemdir. Arıtılmış sudaki askıda katı madde (AKM) miktarının önemli ölçüde azaltılmasını sağlayarak, takip eden UV dezenfeksiyon ünitesinin etkinliğini artırmaktadır. Otomatik ters yıkama sistemi sayesinde filtreler düzenli olarak temizlenmekte, böylece sistem sürekli verimli çalışmaktadır.

Mikrofiltrasyon sonrası su, UV-Dezenfeksiyon ünitesine alınmaktadır. UV sistemi, yüksek verimli lambalar, bu lambaların yerleştirildiği kuvars kılıflardan oluşan modüllerden oluşmaktadır. Sistemde, suyun içeriğindeki mikrobiyolojik yükü yok edecek düzeyde ultraviyole ışını uygulanmakta; bu sayede patojenlerin arıtılmış suyla alıcı ortama taşınması önlenmektedir.

UV sistemi, arıtılmış suyun kalitesine bağlı olarak otomatik dozajlama sistemi ile kontrol edilmekte ve UV lambalarının kirlilik durumuna göre otomatik temizleme ünitesi devreye girmektedir. Bu özellikler, sistemin minimum bakım ile maksimum verimlilikte çalışmasını sağlamaktadır.

UV lambalarının çalışma ortamı olan kanal içindeki su seviyesinin sabit tutulabilmesi için kanal çıkışına ayarlı bir kapak yerleştirilmiştir. Kapak, kanal içerisine monte edilen ultrasonik seviye sensörü vasıtasıyla kontrol edilmekte ve istenilen minimum su seviyesinin altına düşülmemesi sağlanmaktadır. Böylece UV lambalarının her zaman su altında çalışması garanti altına alınmaktadır.

Ayrıca, dezenfekte edilmiş çıkış suyunun belirli bir bölümü, oluşturulan rezerv bölgesinde depolanmakta ve bu su, tesis içinde servis suyu ve peyzaj-sulama suyu gibi geri kullanım amaçlarıyla değerlendirilmektedir. Bu uygulama, suyun döngüsel kullanımını teşvik ederek sürdürülebilir kaynak yönetimine katkı sağlamaktadır.

3.1.3.10 Koku giderim ünitesi

Tesiste taş kapanlı giriş yapısı (7 çevrim saat⁻¹), ızgara kanalları ve ızgaralar (12 çevrim saat⁻¹), giriş pompa istasyonu ile RAS ve fazla çamur pompa istasyonları (12 çevrim saat⁻¹), çamur rezerv tankı (7 çevrim saat⁻¹) ve susuzlaştırma ekipmanlarının bulunduğu alan (12 çevrim saat⁻¹) en düşük hava değişim hızları dikkate alınarak kirli havanın toplandığı başlıca noktalar olarak belirlenmiştir. Bu odaklardan çekilen gazlar, tek hat üzerinde birleşerek bir adet ana koku giderme ünitesine yönlendirilmektedir.

Koku giderme prosesi üç ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Ön Şartlandırma (Scrubber)

- Kirli hava akımı, nem ve sıcaklık şartlarını dengelemek amacıyla PVC dolgu malzemeli, HDPE gövdeye sahip bir dikey scrubberden geçirilir.
- Scrubber, iç yüzeyine yerleştirilmiş nemlendirici nozullar aracılığıyla koku bileşenlerini özellikle H₂S'i çözelti fazına aktarır ve gazın doymuş nem oranına ulaşmasını sağlar.

2. Biyofiltrasyon

- Scrubberden çıkan, ön arıtımı yapılmış hava, kılcal gözenekli dolgu tabakası içeren biyofiltre yatağına verilir.
- Biyokütle, dolgu yüzeyinde tutunan H₂S'i biyolojik oksidasyonla sülfata dönüştürerek koku bileşenlerini ayrıştırır. Bu doğal süreç, kimyasal reaktif kullanmadan yüksek arıtım verimi sağlar.

3. Fan ve Otomasyon

- Sistemdeki tüm hava transferi, kapalı kanal ağı ve yüksek verimli radyal fanlar ile sağlanır.
- Proses parametreleri (hava debisi, basınç kaybı, pH, sıcaklık ve nem) bir PLC/SCADA platformundan izlenir; alarm ve koruma senaryoları bu merkez üzerinden yürütülür.

Bu bütünleşik koku giderme yapısı, hem H₂S'in yasal sınırların altına düşürülmesini hem de işletme güvenliği ve çevre konforunun sağlanmasını hedeflemektedir. Sistemin modüler tasarımı, gelecekte ilave debi artışlarına veya ünite genişletmelerine olanak tanıyarak uzun vadeli tesis planlamasına uyum sağlar.

Koku giderim sisteminde yer alan scrubber ünitesi, gaz akımı içerisinde bulunan H₂S ve benzeri zararlı bileşiklerin yüksek verimle tutulmasını sağlamak üzere, kimyasal dozajlama ve sirkülasyon sistemi ile desteklenmiştir.

Scrubber sisteminde, gazın uygun pH aralığında arıtılmasını sağlamak amacıyla kostik (NaOH) dozaj pompaları monte edilmiştir. Bu sayede, gazın içeriğindeki asidik bileşenlerin etkin bir şekilde nötralize edilmesi sağlanmakta ve gaz yıkama verimi artırılmaktadır.

Scrubber tabanında biriken yıkama sıvısı, yedekli sirkülasyon pompası vasıtasıyla tekrar sistemin giriş kısmına geri gönderilmekte; böylece sıvının homojenliği sağlanmakta ve kimyasal tüketimi optimize edilmektedir.

3.1.3.11 Çıkış deşarj yapısı ve çıkış debimetre

Atık su arıtma tesisinde arıtılmış suyun alıcı ortama deşarj edilmeden önce geçtiği son yapı, çıkış deşarj yapısıdır. Bu yapı, hem arıtılmış suyun hem de gerektiğinde kullanılan by-pass hattının kontrolünü sağlamaktadır.

By-pass hattı, olağan dışı durumlarda arıtma işlemi görmemiş suyun kontrollü bir şekilde yönlendirilmesi amacıyla kullanılmakta olup, arıtılmış suyun by-pass hattına geçişini engellemek üzere kapak ekipmanları ile donatılmıştır. Bu kapaklar sayesinde, proses dışı akımların karışımı engellenerek tesisin çıkış kalitesi korunmaktadır.

Tesis çıkışında, arıtılmış suyun ve varsa by-pass edilen suyun debisinin hassas şekilde ölçülmesi amacıyla, DN600 çapında elektromanyetik debimetre kullanılmıştır. Bu debimetre, iletken sıvıların akış hızını yüksek doğrulukla ölçebilen ve bakım ihtiyacı düşük olan bir sistemdir. Elektromanyetik çıkış debimetresi sayesinde, tesis çıkış suyu debisi sürekli izlenebilmekte ve kayıt altına alınabilmektedir.

Ayrıca, çıkış yapısında SAİS (Sürekli Atık su İzleme Sistemi) kurulmuş olup, bu sistem aracılığıyla tesis performansı çevrim içi (online) olarak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na raporlanmaktadır. SAİS sistemi, çıkış suyunun belirlenen standartlara uygunluğunu kontrol etmek amacıyla sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen, AKM (askıda katı madde), KOİ gibi parametreleri sürekli olarak ölçmekte ve veri kayıt altına alınmaktadır.

3.2 Niksar Arıtma Tesis Arıtma Çamur Potansiyeli ve Karakteristiği

Niksar Atık su Arıtma Tesisinde atık su arıtım süreci sonucunda oluşan biyolojik çamur, çevresel mevzuatlara ve sürdürülebilir yönetim ilkelerine uygun şekilde bertaraf edilmeden önce çeşitli işlemlerden geçirilmektedir. Arıtma çamurunun yönetimi, tesisin proses verimliliği, işletme maliyetleri ve çevresel etkileri açısından büyük önem arz etmektedir.

Tesiste oluşan arıtma çamuru, ilk olarak susuzlaştırma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem ile çamurun hacmi azaltılarak taşıma, kurutma ve bertaraf maliyetleri düşürülmekte, aynı zamanda çamurun nihai bertarafa uygun hale getirilmesi sağlanmaktadır. Susuzlaştırma süreci şu ekipmanları içermektedir:

- **Mekanik yoğunlaştırıcılar:** Çamur içerisindeki serbest suyun azaltılması amacıyla ön yoğunlaştırma işlemi gerçekleştirilir.
- **Santrifüj dekantörler:** Ön yoğunlaştırılmış çamurun mekanik olarak yüksek devirle susuzlaştırılması sağlanır. Bu aşamada çamurun kuru madde oranı %22-25 seviyelerine çıkarılmaktadır.
- **Polimer hazırlama ve dozlama üniteleri:** Çamurun şartlandırılması için uygun polimer türü kullanılarak çamur içerisindeki partiküllerin flokülasyonu sağlanır. Bu sayede santrifüj verimliliği artırılır.
- **Yardımcı ekipmanlar:** Polimer tankları, dozaj pompaları, karıştırıcılar, çamur transfer pompaları ve kontrol sistemlerinden oluşmaktadır.

Susuzlaştırma işlemi sonucunda elde edilen süpernatant, arıtma tesisine geri gönderilerek yeniden arıtıma tabi tutulmaktadır. Böylece suyun geri kazanımı sağlanmakta ve tesisin genel işletme su dengesi korunmaktadır.

Nihai susuzlaştırılmış çamur, daha ileri kurutma işlemleri için solar kurutma ünitesine yönlendirilmekte ya da geçici depolama alanlarında muhafaza edilerek bertarafa hazır hale getirilmektedir.

Bu süreçlerin tamamı, Niksar Arıtma Tesisinin yüksek arıtma verimliliği ve çevreye duyarlı işletme hedefleri doğrultusunda planlanmış ve yapılandırılmıştır. Solar kurutma ünitesinin nihai tasarım parametreleri ve hesap özetleri Çizelge 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Solar kurutuma hesapları (Niksar Belediyesi, 2024).

Hesap Parametreleri	
Giriş Çamuru	
Ortalama Katı Çamur Miktarı,%100 AKM ton/gün	3,3280
Islak Çamur AKM miktarı, %	22
Ortalama Islak Çamur miktarı, ton/gün	15,13
Gereken Kuruluk, %	90
Buharlaştırma	
Yılda buharlaştırılacak su, ton/yıl	4171,77
Buharlaştıran Toplam Su, ton/yıl	4172,49
Yıllık Güneş Radyasyonu Değeri, kwh/m ² /yıl	1401,61
Işık Geçirgenlik Faktörü,%	90
Devridaim Fanı Hesabı	
Fan Kapasitesi, m ³ /s	32000
Bölüm Başına Fan Miktarı, adet	12
Toplam Fan Miktarı, adet	24
Hava Akış Hızı, m ³ hava	384000
Devridaim Havalandırma Oranı, m ³ hava/m ³	37
Egzoz Fanı Hesabı	
Fan Kapasitesi, m ³ /h	32000
Bölüm Başına Fan Miktarı, adet	2
Toplam Fan Miktarı, adet	4
Hava Akış Hızı, m ³ hava	64000
Bölüm Hacmi m ³	10378,80
Havalandırma Oranı, m ³ hava/m ³	6,17
Alan Hesabı	
Kurulum Alanı	
Kuru Çamur Miktarı, ton/yıl	1349,69
Bölüm Miktarı, adet	2
Bölüm Genişliği, m	12
Bölüm Yüksekliği, m	129
Brüt Kurulum Uzunluğu, m	135
Net Kurutma Alanı, m ² , bölüm başına	1548
Brüt Kurutma Alanı, m ² , bölüm başına	1620
Brüt Kurulum Alanı, m ²	3240
SSD Maksimum Çamur Yüksekliği, cm	40

Çizelge 3.2. Yıllık güneş radyasyonu miktarları (Niksar Belediyesi, 2024).

Aylar	Güneş radyasyonu, kwh/m ² .ay	Güneş radyasyonu, kwh/m ² .gün
Ocak	49,6	1,6
Şubat	68,4	2,44
Mart	106,95	3,45
Nisan	135,9	4,53
Mayıs	179,49	5,79
Haziran	184,5	6,15
Temmuz	187,55	6,05
Ağustos	168,95	5,45
Eylül	130,8	4,36
Ekim	93,31	3,01
Kasım	54	1,80
Aralık	42,16	1,36
Toplam	1401,61	45,99

Solar kurutma sistemi, özellikle küçük ve orta ölçekli atık su arıtma tesisleri için ekonomik, çevreci ve düşük enerjili bir çamur azaltma yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Niksar Belediyesi tarafından tesis tasarımında tercih edilen bu sistem, bölgenin iklimsel avantajlarını kullanarak çamur hacmini önemli ölçüde düşürmekte, böylece nihai bertaraf maliyetlerini azaltmaktadır. Kurutulan çamurun kuru madde oranının %90 seviyelerine ulaşması, gerek ek yakıt olarak kullanım gerekse düzenli depolama koşullarına uygunluk açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Tasarım parametreleri dikkate alındığında, solar kurutma sürecinin verimliliği doğrudan güneş radyasyonu miktarına ve sistemin hava sirkülasyonu kapasitesine bağlıdır. Bu bağlamda, 2024 yılına ait iklim verileri üzerinden hesaplanan yıllık güneş radyasyonu değeri 1401,61 kWh/m²/ay olarak belirlenmiştir. Bu değer, Türkiye koşullarında solar kurutma sisteminin çalışabilirliği açısından yeterli bir düzeydedir. Ayrıca kurutma tesisinde kullanılan fan sistemlerinin kapasitesi ve havalandırma oranları, çamur içerisindeki nemin hızlı ve etkin şekilde uzaklaştırılmasını mümkün kılmaktadır.

Sistemde kullanılan devridaim ve egzoz fanları, bölümler arası hava akışını optimize ederek kurutma sürecini desteklemekte; bu sayede çamur kurutma süresi kısaltmakta ve kurutma alanının verimliliği artmaktadır. Kurulum alanı ve net kurutma yüzeyine ilişkin hesaplamalar, tasarımın çevresel etkileri minimize edecek şekilde kompakt ve işlevsel bir yapıda olduğunu göstermektedir.

Arıtma çamurlarının nihai bertaraf veya geri kazanımı öncesinde hacminin azaltılması, stabilizasyonunun sağlanması ve hijyenik hale getirilmesi amacıyla çeşitli işleme basamaklarından geçirilmesi gerekmektedir. Niksar Atık su Arıtma Tesisinde yer alan çamur işleme üniteleri aşağıda Çizelge 3.3'te verilmiştir:

Çizelge 3.3. Çamur işlenecek üniteler (Niksar Belediyesi, 2024).

Aktif Çamur Tankları	Çamur ve suyun verimli bir şekilde karışmasının sağlanması ve çamurun tanklarda çökmesinden kaçınılması için havalandırma tanklarının her biri düşük devirli dalgıç mikserlerle donatılmıştır. Karıştırıcılar 0,3 m/s ortalama yatay su hızına göre tasarlanmıştır. Tank sayısı: 3 ünite Hacim, Toplam: 20.092 m³ MLSS Konsantrasyonu: 4,00 kg AKM/m³ Çamur yaşı (toplam): 25 gün
Çamur Yoğunlaştırma	Çamur içeriğini %5 - 6 kuru madde oranına çıkaran mekanik çamur yoğunlaştırıcılar kullanılmaktadır. Mekanik yoğunlaştırıcılarda yaklaşık 2-3 kg/ton kuru madde miktarında polimer kullanılmaktadır.
Çamur Susuzlaştırma	Santrifüjler kullanarak çamur susuzlaştırılmaktadır. Yaklaşık %20-22 arasında kuru madde içeriği elde edilmektedir. Çamurun santrifüjlerde susuzlaştırılmasındaki polimer tüketimi kuru madde tonu başına yaklaşık 4 - 6 kg etkin polimerdir.
Çamur Kurutma	Santrifüjlerde yaklaşık %20-22 kuru madde içeriğine susuzlaştırılan çamurun yüzde 90 KM içeriğine kurutulması için solar tipi kurutma sistemi kullanılmaktadır. Ünite Adedi: 1 Adet Çamur çıkışı: %90 AKM
Çamur Depolama Tankı	Çamurun verimli bir şekilde karışmasının sağlanması ve çamurun tanklarda çökmesinden kaçınılması için depolama

Arıtma çamurlarının yönetimi açısından, mevcut ve gelecekteki çamur miktarının doğru tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Niksar Atık su Arıtma Tesisinin tasarım debisi ve nüfus projeksiyonları doğrultusunda hesaplanan çamur üretim miktarları aşağıda Çizelge 3.4'te verilmiştir:

Çizelge 3.4. Tesiste ortaya çıkacak arıtma çamuru miktarı ve projeksiyonu (Niksar Belediyesi, 2024).

Hedef Yıl	Öngörülen Eşdeğer Nüfus	Öngörülen Çamur Miktarı (ton/gün)
2021	56.149	2,46
2032	64.939	3,02
2047	71813	3,51

Niksar Atık su Arıtma Tesisinde oluşan çamur, biyolojik arıtma proseslerinin sonucunda elde edilmekte ve fiziksel-kimyasal özelliklerine göre çeşitli işleme aşamalarından geçirilmektedir.

Atık su arıtma tesislerinde oluşan fazla biyolojik çamur, susuzlaştırma işleminden geçirilerek bertarafa uygun hale getirilir.

Niksar Arıtma Tesisi'nde günlük susuzlaştırma ünitesine verilen ortalama çamur miktarı 2.713,51 kg/gün'dür. Bu değer, yaklaşık 2,7 ton/gün mertebesinde olup tesis kapasitesiyle uyumludur. Son çöktürme tankından alınan taban çamurundaki askıda madde konsantrasyonu 13,33 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bu yüksek konsantrasyon, çamurun yoğun bir yapıya sahip olduğunu gösterir ve sonraki susuzlaştırma ile kurutma basamakları için verimli bir başlangıç şartı sunar.

- Günlük susuzlaştırıcıya giden çamur miktarı: 2.713,51 kg/gün (yaklaşık 2,7 ton/gün)
- Son çöktürme tankı taban çamuru askıda madde konsantrasyonu: 13,33 kg/m³

Yoğunlaştırma Süreci; Yoğunlaştırma birimi, çamurdaki serbest suyu uzaklaştırarak kuru madde (KM) konsantrasyonunu artırmayı amaçlar. Niksar Atık su arıtma tesisinde yoğunlaştırma sonunda hedeflenen KM oranı %5–6'dır; bu oran, geleneksel sistemlerdeki %3–4 seviyesinin üzerindedir. Yüksek bir KM oranı, susuzlaştırma ve kurutma ünitelerinde gereken enerji ile zaman yükünü azaltır. Yoğunlaştırma esnasında 2–3 kg/ton KM oranında polimer ilavesi yapılmaktadır; bu sayede çamurun floklanma hızı artar ve çökme performansı iyileşir.

- Hedef KM oranı (yoğunlaştırma): %5–6 (geleneksel sistemlerde ~%3–4)
- Polimer tüketimi (yoğunlaştırma): 2–3 kg/ton KM

Susuzlaştırma süreci; yoğunlaştırılmış çamur, santrifüjlü susuzlaştırıcıdan geçirilerek daha fazla sudan arındırılır. Santrifüj cihazı yüksek dönüş hızıyla katı-sıvı ayrımı yapar ve çamuru mekanik olarak sıkıştırır. Niksar tesisinde susuzlaştırma sonrası hedef KM oranı %20–22 olarak belirlenmiştir; bu aralık modern santrifüj sistemlerin tipik tasarım değerlerine uygundur. İşlem boyunca 4–6 kg/ton KM oranında polimer dozu eklenmektedir; böylece ince çökelti taneleri birleşerek susuzlaştırma etkinliği artırılmaktadır.

- Hedef KM oranı (susuzlaştırma sonrası): %20–22
- Polimer tüketimi (susuzlaştırma): 4–6 kg/ton KM

Susuzlaştırma-Yoğunlaştırma; Arıtma çamurunun nihai bertarafı ya da yeniden kullanımına geçmeden önce uygulanması gereken temel ön işlemlerden biri susuzlaştırma ve yoğunlaştırmadır. Bu işlemlerin temel amacı, çamur hacmini azaltarak taşıma, depolama ve kurutma gibi sonraki işlemlerdeki maliyetleri düşürmektir. Ayrıca yüksek nem içeriğine sahip çamurların enerji geri kazanımında kullanılması teknik olarak mümkün olmadığından, nemin azaltılması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Niksar Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisi özelinde yapılan proses seçimi çalışmalarında, çamur içerisindeki suyun verimli bir şekilde uzaklaştırılması için iki aşamalı susuzlaştırma stratejisi benimsenmiştir. Bu strateji kapsamında ilk aşamada çamur yoğunlaştırılarak kuru madde (KM) içeriği %5–6 seviyesine çıkarılmakta, ardından santrifüj sistemleriyle susuzlaştırılarak %20–22 seviyelerine ulaşılmaktadır.

Bu yöntem sayesinde:

- Nihai solar kurutmaya giren çamurun nem içeriği ciddi oranda azaltılarak kurutma süresi kısaltılmakta,
- Enerji tüketimi ve işletme maliyetleri düşürülmekte,
- Solar kurutma verimliliği artırılmaktadır.

Yapılan fizibilite ve alternatif değerlendirme çalışmaları kapsamında çeşitli yoğunlaştırma teknolojileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda:

Belt tipi mekanik yoğunlaştırıcılar, özellikle sürekli ve kontrollü işletim sağlanabilmesi, kısa sürede yüksek verimle çalışması ve iklim koşullarından bağımsız olması sayesinde tercih edilmiştir.

Yoğunlaştırma ve susuzlaştırma işlemlerinde çamur faz ayrımını kolaylaştırmak için polimer şartlandırması uygulanmaktadır. Kimyasal kullanım miktarları, çamur karakteristiklerine (özellik direnç, organik içerik vb.) göre optimize edilmelidir. Fazla polimer kullanımı, çamur maliyetlerini artırabileceği gibi filtrasyon sistemlerinde sorunlara yol açabileceğinden dikkatli kontrol edilmelidir.

Kurutma Süreci; Susuzlaştırıcıdan çıkan çamur, nihai kurutma işlemine tabi tutulur. Niksar Atık su Arıtma Tesisi'nde seçilen kurutma yöntemi sera tipi solar kurutmadır. Bu kapalı sistemde çamur, güneş enerjisinin etkisini artırmak amacıyla sürekli karıştırılarak ve havalandırılarak kurutulur. Sistem tasarımında hedeflenen kuru madde oranı %90'dır; bu yüksek kuru madde içeriği çamurun depolanmasını ve nihai bertarafını kolaylaştırır.

Kurutma prosesi, arıtma çamurunun nihai bertarafı veya yeniden kullanımı açısından kritik bir adımdır. Özellikle çamurun stabilize edilip susuzlaştırılmasının ardından, içeriğindeki nem oranının daha da azaltılması; hem bertaraf sahasına taşınmasında ekonomik avantajlar sağlar hem de çamurun farklı kullanım alanlarına (örneğin enerji geri kazanımı veya tarımsal uygulamalar) uygun hale getirilmesini mümkün kılar.

Bu bağlamda, taşıma ve bertaraf maliyetlerinin minimize edilmesi amacıyla, stabilize edilen ve santrifüjlerle susuzlaştırılan çamurun, solar kurutma yöntemi ile %90 kuru madde (KM) içeriğine kadar kurutulması hedeflenmektedir. Yüksek kuru madde oranı, çamurun:

- Hacmini ve ağırlığını önemli ölçüde azaltmakta,
- Bertaraf sahasında kapladığı alanı minimize etmekte,
- Alternatif değerlendirme senaryoları (ek yakıt, tarımsal kullanım, kompostlama) için gerekli fiziksel özellikleri karşılamasını sağlamaktadır.

Bu yönüyle kurutma işlemi, yalnızca çamurun fiziksel karakteristiğini değiştirmekle kalmamakta, aynı zamanda nihai bertaraf stratejisinin belirleyici bir unsuru olarak önem teşkil etmektedir.

Solar kurutma sistemi, bölgenin yüksek güneşlenme süresi ve iklim koşullarının uygunluğu nedeniyle çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Kurutma işlemi sera tipi, havalandırmalı ve karıştırılmalı kapalı sistemlerde gerçekleştirilecek olup, çamurun sıcaklık ve havalandırma kontrollü ortamda kurutulması sağlanacaktır. Bu sayede hem kurutma süresi kısaltılacak hem de homojen bir ürün elde edilecektir.

Ayrıca kurutma işlemi, arıtma çamurunun ek yakıt olarak kullanılabilirliğini artırmak amacıyla da ön koşuldur. Yüksek ısı değere sahip alternatif yakıt üretimi için minimum %90 KM içeriği gerekmektedir. Bu nedenle kurutma, yalnızca çevresel değil, enerji geri kazanımı açısından da stratejik öneme sahiptir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Arıtma Çamuru Analizleri ve Karakterizasyonu

4.1.1 Toprakta kullanım için yapılan arıtma çamuru analizleri

Stabilize arıtma çamurunun kalite ve güvenlik parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla, numune alma süreci titizlikle yürütülmelidir. Bu bağlamda, stabilize arıtma çamuru örnekleri, stabilizasyon işlemi tamamlandıktan sonra ve çamurun nihai kullanıcıya sevk edilmesinden önce alınmalıdır. Numunenin temsili nitelikte olabilmesi için, arıtma çamuru yığınının en az 25 farklı noktadan örnekler alınarak homojenize edilir ve tek bir bileşik numune elde edilir. Bu yöntemle, analizlerde kullanılacak örneğin çamurun genel özelliklerini yansıtmaya ve yeterli miktarda olması sağlanır.

Bu çalışma kapsamında, Niksar Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisi'nde yer alan solar kurutma ünitesinden elde edilen stabilize arıtma çamurunun karakterizasyonu amacıyla, 24 Mayıs 2024 tarihinde solar kurutma ünitesi çıkışından numune alınmıştır. Numune alma işlemi, stabilize çamurun üretim koşullarını temsil edecek şekilde farklı noktalardan alınan çamur örneklerinin homojen şekilde karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiş ve analiz için toplamda 2 kg'dan fazla kompozit numune hazırlanmıştır.

Hazırlanan stabilize arıtma çamuru örneği, analiz edilmek üzere Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) laboratuvarına gönderilmiştir. Analizler, “Toprakta Kullanım Amaçlı Arıtma Çamurlarının Kontrolü Yönetmeliği” (2010) kapsamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, aynı yönetmeliğin Ek-1/B (Ağır Metaller), Ek-1/C (Organik Kirleticiler) ve Ek-1/D (Mikrobiyolojik Parametreler) tablolarında belirtilen sınır değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu sayede, arıtma çamurunun tarımsal toprakta kullanıma uygunluğu bilimsel temellere dayalı olarak belirlenmiştir. Stabilize arıtma çamuru solar çıkış analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Stabilize arıtma çamuru solar çıkış analiz sonuçları (TÜBİTAK, 2024).

Parametre / Numune	Arıtma Çamuru (mg/kg)	Yönetmelik Limit Değeri
Kurşun (Pb)	10,3	750
Kadmiyum (Cd)	0,22	10
Krom (Cr)	26,8	1000
Bakır (Cu)	136,4	1000
Nikel (Ni)	35,6	300
Çinko (Zn)	393,8	2500
Cıva (Hg)	< 0,5	10
Azot (TKN)	58428	---
Fosfor (P)	24945	---
PAH	1,716	6
PCB	< 0,1	0,8
PCDD/F (ng TEQ/kg)	12,5	100
pH	6,62	---
C/N (%)	5,75	---
Nem (%)	3,4	---
Kuru Madde (%)	94,6	---
Organik Madde (550°C’de) (%)	68,2	---
İletkenlik (dS/m)	4450	---
E. Coli (EMS/g)	2,26 Log 10	2 Log 10

Niksar Atık su Arıtma Tesisi’nden 24.05.2024 tarihinde solar kurutma ünitesi çıkışından alınan arıtma çamuru örneği, TÜBİTAK tarafından analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, arıtma çamurunun toprakta tarımsal amaçla kullanımına uygunluğunu belirlemek amacıyla, “Toprakta Kullanım Amaçlı Arıtma Çamurlarının Kontrolü Yönetmeliği” (Ek-1 B, C, D) ile karşılaştırılmıştır.

Ağır metal içerikleri bakımından, çamurda tespit edilen kurşun (10,3 mg/kg), kadmiyum (0,22 mg/kg), krom (26,8 mg/kg), bakır (136,4 mg/kg), nikel (35,6 mg/kg), çinko (393,8 mg/kg) ve cıva (<0,5 mg/kg) değerlerinin tamamı, yönetmelikte belirtilen maksimum sınır değerlerin oldukça altındadır.

Özellikle kurşun, kadmiyum ve cıva gibi toksik etkileri yüksek metallerde belirlenen seviyeler, çevresel risk taşımayacak düzeydedir. Bu durum, arıtma çamurunun ağır metal kirliliği açısından toprakta kullanım açısından güvenli olduğunu göstermektedir.

Organik kirleticiler açısından bakıldığında; PAH (1,716 mg/kg), PCB (<0,1 mg/kg) ve PCDD/F (12,5 ng TEQ/kg) değerleri de sırasıyla yönetmelik limitleri olan 6 mg/kg, 0,8 mg/kg ve 100 ng TEQ/kg'ın altında kalmaktadır. Bu sonuçlar, çamurun organik kirleticiler bakımından da yönetmeliğe uygun olduğunu ortaya koymaktadır..

Çamurun pH (6,62), organik madde içeriği (%68,2) ve iletkenlik (4450 dS/m) gibi fiziksel-kimyasal özellikleri de, tarım toprağı kalitesini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek organik madde içeriği, toprak verimliliğini artırma yönünden olumlu bir özelliktir.

Biyolojik parametrelerden biri olan E. coli düzeyi 2,26 log₁₀ cfu/g olarak belirlenmiş olup, bu değer yönetmelikte belirtilen sınır olan 2 log₁₀'a oldukça yakın bir seviyededir. Dolayısıyla çamurun hijyenik hale getirilmesi amacıyla ek stabilizasyon işlemi önerilmektedir. Stabilizasyon işlemi yalnızca patojen azaltımı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çamurun organik yapısını daha kararlı hâle getirerek tarımsal uygulamalarda etkinliğini artırır.

4.1.2 Atık yönetimi yönetmeliği ek 3/b kapsamında yapılan analizler

Niksar Belediyesi Atık su Arıtma Tesisi'nde oluşan arıtma çamurunun çevre ve insan sağlığı açısından oluşturabileceği olası risklerin belirlenebilmesi amacıyla, Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek 3/B'de tanımlanan kriterler doğrultusunda fiziksel, kimyasal, biyolojik ve toksikolojik analizler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analizler, yetkili ve akredite bir laboratuvar olan TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü tarafından yapılmıştır. Çalışma kapsamında numunenin pH, nem oranı, kuru madde, kızdırma kaybı ve toplam organik karbon (TOK) gibi temel fizikokimyasal özellikleri değerlendirilmiş; ayrıca çinko, kurşun, bakır, nikel, krom, kadmiyum ve cıva gibi ağır metal konsantrasyonları ölçülerek yönetmelikte belirtilen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Organik kirletici varlığı, uçucu ve yarı uçucu organik bileşik analizleri ile incelenmiş; çamurun ekotoksikolojik etkileri ise balık biyodeneyi (LC50-ZSF) ve

Daphnia magna akut toksisite testleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen analiz verileri Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.2. Arıtma çamurunun fizikokimyasal özellikleri (TÜBİTAK MAM, 2025).

Parametre	Sonuç	Birim
Koku	Hafif kokulu	-
pH (sulu çözelti)	7,07	-
Nem	5,0	%
Kuru Madde	95,0	%
Kızdırma Kaybı	57,9	%
Kızdırma Kalıntısı	42,1	%
Toplam Organik Karbon (TOK)	21,5	%

pH Değeri: Numunenin pH değeri 7,07 olarak ölçülmüş, bu değer çamurun nötr karakterde olduğunu ve çevreye verildiğinde asidik ya da bazik bir etki yaratmayacağını göstermektedir.

Nem ve Kuru Madde Oranı: Nem oranı %5,0, kuru madde oranı ise %95,0 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, çamurun başarılı bir şekilde susuzlaştırıldığını ve bertaraf veya yeniden kullanım açısından elverişli özellikte olduğunu göstermektedir.

Kızdırma Kaybı ve Kızdırma Kalıntısı: Kızdırma kaybı %57,9, kızdırma kalıntısı ise %42,1 olarak belirlenmiştir. Kızdırma kaybının yüksek olması, çamurun organik maddece zengin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum çamurun, toprak iyileştirme veya enerji geri kazanımı gibi uygulamalar için değerlendirilebileceğini işaret etmektedir.

Toplam Organik Karbon (TOK): TOK oranı %21,5 olarak ölçülmüştür. Bu yüksek oran, organik içerikli yapının varlığını desteklemekte olup, organik bazlı uygulamalarda yeniden kullanım potansiyelini göstermektedir.

Koku: Numunenin “hafif kokulu” olması, stabilizasyon işleminin etkin bir şekilde gerçekleştirildiğini ve çamurun çevreye yayacağı rahatsızlığın düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.3. İnorganik içerik analizleri (TÜBİTAK MAM, 2025).

Element	Konsantrasyon (mg/kg KM)
Sodyum (Na)	1.266
Magnezyum (Mg)	3.674
Alüminyum (Al)	1.185
Potasyum (K)	5.506
Kalsiyum (Ca)	28.728
Titanyum (Ti)	290,9
Mangan (Mn)	140,9
Demir (Fe)	5.243
Çinko (Zn)	224,3

Bu elementlerin tamamı toksik ağır metaller sınıfında olmamakla birlikte, iz element olarak çamurda doğal olarak bulunan ve çevreye zarar vermeyen türlerdir. Ayrıca çinko değeri 224,3 mg/kg olup, Ek 3/B sınır değeri olan 2500 mg/kg'ın oldukça altındadır.

Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek-3/B sınır ağır metal analiz sonuçlarının karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Ağır metal değerlerinin değerlendirilmesi (EK 3/B sınırlarıyla karşılaştırma) (TÜBİTAK MAM, 2025).

Parametre	Ölçülen Değer (mg/kg kuru madde)	Ek 3/B Sınır Değeri (mg/kg kuru madde)	Uygunluk
Kurşun (Pb)	10,3	750	Uygun
Kadmyum (Cd)	0,22	10	Uygun
Krom (Cr)	26,8	1000	Uygun
Bakır (Cu)	136,4	1000	Uygun
Nikel (Ni)	35,6	300	Uygun
Çinko (Zn)	393,8	2500	Uygun
Cıva (Hg)	<0,5	10	Uygun

Tüm ağır metal değerleri yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin oldukça altında kalmakta olup, bu durum çamurun çevresel açıdan güvenli olduğunu göstermektedir.

Arıtma çamurunun çevresel etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen toksisite analizleri kapsamında yapılan testlerin genel değerlendirmesi Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Bu testler, arıtma çamurunun çevrede toksik etki oluşturup oluşturmadığını belirlemeye yönelik olup; özellikle sucul canlılar üzerinde etkili olup olmadığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.5. Kullanılan toksisite testleri ve yorumları.

Test Türü	Açıklama	Yorum / Değerlendirme Kriteri
Balık Biyodeneyi (LC50, ZSF)	Numunenin balıklar üzerindeki öldürücü etkisinin test edilmesidir.	ZSF (Zehirlilik Seyreltme Faktörü) ≥ 5 ise toksik değildir (SKKY'ye göre).
Daphnia magna Akut Toksisite Testi	Tatlı su kabuklularının hareketsizlik oranı ölçülür (inhibitör etki).	%100, %50 eluatlarda toksik etki varsa, %12,5 ve altı konsantrasyonlarda etki olmamalıdır.

Arıtma çamurunun çevresel toksik etkilerini belirlemek amacıyla numune üzerinde Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) “Numune Alma ve Analiz Metotları Tebliği”ne uygun olarak akut toksisite testi uygulanmıştır. Testte, çamurdan hazırlanan 100 g/L’lik (1/10 seyreltilmiş) eluat kullanılmış ve ortalama öldürücü konsantrasyon (LC50) değeri esas alınarak Zehirlilik Seyreltme Faktörü (ZSF) hesaplanmıştır.

Analiz sonucu, ZSF = 8 olarak belirlenmiştir. SKKY’ye göre, ZSF değeri 5 ve üzerinde olan numuneler, balıklar açısından toksik olarak kabul edilmemektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2009). Bu bağlamda, Nıksar Belediyesi Atık su Arıtma Tesisi’ne ait çamur örneği, akut toksisite göstermemektedir.

Arıtma çamurunun çevresel toksisite potansiyelinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen Daphnia magna akut toksisite testi, çamur süzütüsünün suda yaşayan canlılar üzerindeki etkisini değerlendirmeye yöneliktir. Test 24 saatlik sürede farklı seyreltme oranlarında yapılmış ve elde edilen bulgular Çizelge 4.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Daphnia magna akut toksisite test sonuçları (24 saat sonunda) (TÜBİTAK MAM,2025).

Numune Kompozisyonu	Hareketli Daphnia Sayısı (5 üzerinden)	Toksik Etki Durumu
%100 Numune Eluatı	0/5, 0/5, 0/5, 0/5	Toksik
%50 Eluat - %50 Seyreltme Suyu	0/5, 0/5, 0/5, 0/5	Toksik
%25 Eluat - %75 Seyreltme Suyu	5/5, 5/5, 4/5, 5/5	Marjinal etki
%12,5 Eluat - %87,5 Seyreltme Suyu	5/5, 5/5, 5/5, 5/5	Toksik değil
%6,25 Eluat - %93,75 Seyreltme Suyu	5/5, 5/5, 5/5, 5/5	Toksik değil
%100 Seyreltme Suyu (Kontrol)	5/5, 5/5, 5/5, 5/5	Toksik değil

Eluat, farklı konsantrasyonlarda (%100, %50, %25, %12,5 ve %6,25) seyreltilerek hazırlanmış ve 24 saatlik test süresi sonunda hareketsiz Daphnia magna (su piresi) sayısı değerlendirilmiştir.

%100, %50 ve %25 oranındaki numune eluatı ile yapılan testlerde, tüm Daphnia bireylerinin hareketsiz (inhibe) olduğu, %12,5 ve altı seyreltilmiş çözeltilerde ise tüm bireylerin hareketli kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, çamurun belirli konsantrasyonlarda akut toksik etki gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Arıtma çamurunun doğaya bırakılmadan önce toksik etkisinin değerlendirilmesi, yeniden kullanım ve bertaraf seçeneklerinin güvenliğini belirlemek açısından önemlidir. TÜBİTAK MAM tarafından gerçekleştirilen toksikolojik analiz sonuçları Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Arıtma çamuruna ait toksisite test sonuçları (TÜBİTAK MAM, 2025).

Test	Parametre/Değer	Değerlendirme Kriteri	Uygunluk
Balık Biyodeneyi	ZSF = 8	$ZSF \geq 5$ (SKKY'ye göre uygundur)	Uygun
Daphnia magna (Akut Test)	%100, %50, %25 eluat: toksik etki %12,5 ve altı: toksik etki yok	Düşük seyreltilerde toksisite olmaması yeterli görülür	Koşullu Uygun

Arıtma çamurunun çevresel güvenliğini belirlemek amacıyla yapılan balık biyodeneyi (LC50-ZSF) ve Daphnia magna akut toksisite testleri, çamurun ekotoksik karakteri hakkında önemli bulgular sunmuştur. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) çerçevesinde yürütülen balık biyodeneyinde elde edilen Zehirlilik Seyreltme Faktörü (ZSF) değeri 8 olarak belirlenmiş; bu değer, yasal sınır olan $ZSF \geq 5$ 'in üzerinde olduğu için, numunenin balıklar açısından akut toksik etki göstermediğini ortaya koymuştur.

Diğer yandan, Daphnia magna ile yapılan akut toksisite testinde %100, %50 ve %25 eluat konsantrasyonlarında tüm bireylerde inhibisyon (hareketsizlik) gözlemlenmiş; buna karşın %12,5 ve altı seyreltilmiş çözeltilerde ise tüm bireylerin hareketli kaldığından toksik etki oluşmamıştır. Bu durum, çamurun yüksek konsantrasyonlarda akut toksik etki gösterebildiğini, ancak seyreltilmesi hâlinde çevresel güvenlik açısından uygun hale geldiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, ZSF testinin pozitif olması ve Daphnia testindeki sınır değerlerin aşılmaması, arıtma çamurunun kontrollü şartlarda yeniden kullanımına yönelik potansiyel taşıdığını göstermektedir. Bu durum, çamurun çevreye doğrudan veya seyreltilmeden verilmemesi gerektiğini gösterse de uygun önlemlerle kullanımının mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1.3 Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik ek-2'ye göre yapılan analizler

Arıtma çamurunun bertaraf yönteminin belirlenebilmesi amacıyla, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDY) Ek-2 kapsamında yer alan atık kabul kriterleri dikkate alınarak yapılan analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Söz konusu yönetmelikte atıklar; inert (III. sınıf), tehlikesiz (II. sınıf) ve tehlikeli (I. sınıf) olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmakta olup, her sınıf için toplam ağır metal konsantrasyonları ve toksisite gibi kriterlere göre belirlenmiş sınır değerler tanımlanmaktadır.

Arıtma çamurunun düzenli depolama sahalarına kabul edilebilmesi için, içerdiği ağır metallerin ADDY Ek-2'de belirtilen limitlerin altında olması gerekmektedir. TÜBİTAK MAM (2025) analiz sonuçları esas alınarak yapılan karşılaştırma Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Arıtma çamurundaki ağır metallerin ADDY ek-2 sınır değerleriyle karşılaştırılması.

Parametre	Ölçülen Değer (mg/kg KM)	III. Sınıf Limit	II. Sınıf Limit	I. Sınıf Limit	Uygunluk
Kurşun (Pb)	10,3	50	200	750	II. Sınıf
Kadmiyum (Cd)	0,22	1	5	10	II. Sınıf
Krom (Cr)	26,8	50	250	1000	II. Sınıf
Bakır (Cu)	136,4	100	500	1000	II. Sınıf
Nikel (Ni)	35,6	40	200	300	II. Sınıf
Çinko (Zn)	393,8	200	1000	2500	II. Sınıf
Cıva (Hg)	<0,5	0,2	2	10	II. Sınıf

Yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere, çamur numunesindeki bazı ağır metaller (örneğin bakır, çinko ve cıva), III. sınıf (inert atık) limitlerini aşmakta; buna karşın tüm parametreler II. sınıf atık sınırlarının altında kalmaktadır. Bu nedenle söz konusu arıtma çamuru, inert sınıfta değerlendirilemez; ancak tehlikesiz atık olarak II. sınıf düzenli depolama sahalarına kabul edilebilir niteliktedir.

Toksisite değerlendirmesi kapsamında yapılan balık biyodeneyi sonucunda ZSF değeri 8 olarak belirlenmiştir. Yönetmeliğe göre LC50 değeri 1 mg/L'nin altında olan atıklar tehlikeli kabul edilmekteyken, analiz edilen numunede bu değer üzerinde çıkmış ve toksik karakter göstermediği sonucuna ulaşılmıştır. Daphnia magna ile yapılan akut toksisite testinde ise yalnızca yüksek eluat konsantrasyonlarında toksik etki gözlemlenmiş, ancak düşük konsantrasyonlarda bu etki ortadan kalkmıştır. Bu da çamurun çevreye doğrudan veya seyreltilmeden uygulanmaması gerektiğini ancak uygun önlemler ile yönetilebileceğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya genelinde hızla artan nüfus, kentleşme ve tüketim alışkanlıklarına paralel olarak atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuru miktarı her geçen gün artmaktadır. Bu artış, yalnızca çamur yönetimi açısından değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik açıdan da önemli sorunları beraberinde getirmektedir. Özellikle büyük kentlerde ve gelişmiş sanayi bölgelerinde yoğunlaşan bu artış, arıtma çamurlarının güvenli ve sürdürülebilir biçimde bertaraf edilmesini bir zorunluluk hâline getirmiştir.

Yakma yöntemi, enerji geri kazanımı sağlayarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilmektedir. Ancak bu yöntemin temel dezavantajı, arıtma çamurunda bulunan başta azot ve fosfor olmak üzere besin maddelerinin yok olması nedeniyle bu elementlerin tarımsal uygulamalarda yeniden kullanılamamasıdır. Bu durum, besin maddesi ihtiyacının karşılanması için ticari gübre üretimine ve dolayısıyla fosil yakıt kullanımının devamına neden olmaktadır.

Bununla birlikte, genellikle göz ardı edilen ancak çevresel açıdan önemli olan bir diğer unsur ise nakliye ihtiyacının azalmasıdır. Yakma işlemi çoğunlukla atık su arıtma tesisinin kendi bünyesinde gerçekleştirildiğinden, alternatif bertaraf yöntemlerine kıyasla taşıma kaynaklı çevresel etkiler ve maliyetler minimize edilmektedir. Ayrıca, yakma işlemi sonunda elde edilen kül, asfalt üretimi ve inşaat malzemelerinde katkı maddesi olarak değerlendirilebilmekte, böylece hem taş ocağı ihtiyacı azaltılmakta hem de kirletici maddeler kalıcı olarak immobilize edilerek çevreye zarar vermeyecek şekilde izole edilmektedir. Bu yönüyle yakma işlemi, yalnızca bertaraf değil, aynı zamanda ikincil kaynak geri kazanımı açısından da önemli bir potansiyele sahiptir.

Niksar Belediyesi Atık su Arıtma Tesisi gibi küçük-orta ölçekli belediye tesisleri için yakma yöntemi, teknik açıdan uygulanabilir olmamakla birlikte, ekonomik ve lojistik açıdan genellikle önerilmemektedir.

Niksar Belediyesi Atık su Arıtma Tesisi'nden çıkan arıtma çamuru, sahip olduğu yüksek kuru madde oranı (%95) ve düşük nem içeriği (%5) sayesinde teknik olarak yakılabilir niteliktedir. Ancak tesisin kapasitesi, atık su arıtım hacmi ve bölgesel

ölçeği göz önüne alındığında, bu tesise özel olarak yerinde bir yakma ünitesi kurulması kısa ve orta vadede ekonomik ve operasyonel açıdan rasyonel bir çözüm değildir. Yakma tesislerinin kurulumu, yüksek teknolojili baca gazı arıtım sistemleri, otomasyon altyapısı ve ısıl işlem ekipmanları gerektirdiğinden ön yatırım ve işletme maliyetleri oldukça yüksektir. Buna ek olarak, tesisin sınırlı çamur üretimi nedeniyle elde edilecek enerji miktarı düşük kalmakta, bu da enerji geri kazanımından elde edilecek ekonomik getiriyi sınırlı hâle getirmektedir.

Ayrıca yakma işlemi sonucunda ortaya çıkan uçucu kül ve taban külü gibi ikincil atıkların yönetimi de ek maliyet ve çevresel sorumluluk doğurmaktadır. Bu nedenle, bu ölçekteki bir belediye arıtma tesisi için münferit bir yakma sistemi yerine, daha sürdürülebilir ve ekonomik seçenekler olan tarımsal kullanım, kompostlama veya II. sınıf düzenli depolama yöntemlerinin tercih edilmesi daha uygun görünmektedir.

Ancak yakma, özellikle çamurun içeriğinde patojen, yüksek miktarda organik kirlenici veya kullanımı engelleyen toksik bileşiklerin bulunması durumunda nihai bertaraf yöntemi olarak değerlendirilebilir. Bu durumda da en uygun senaryo, Niksar ve çevresindeki ilçe belediyelerinin arıtma çamurlarını işleyebilecek kapasitede bölgesel bir yakma tesisi kurulmasıdır. Böylece hem enerji geri kazanımı optimize edilebilir hem de ekonomik ölçek büyütülerek yatırım maliyeti rasyonelleştirilebilir. Dolayısıyla, Niksar Belediyesi özelinde yakma yöntemi bireysel değil, bölgesel iş birliği temelinde ele alınmalıdır.

Arıtma çamurunun tarım arazilerinde kullanımı, hem toprak sağlığı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Çamurun içeriğinde bulunan azot, fosfor ve organik karbon gibi temel besin maddeleri sayesinde, tarımda kullanılan kimyasal gübre ihtiyacının azaltılması mümkün hâle gelmektedir. Özellikle azotun kontrollü biçimde toprağa kazandırılması, nitrat emisyonlarının azalması açısından da olumlu bir etki yaratmaktadır. Bununla birlikte çamur, sahip olduğu organik madde içeriği ile toprak yapısını iyileştirerek su tutma kapasitesi, havalanma ve biyolojik aktivite gibi özellikleri desteklemektedir.

Daha geniş ölçekte değerlendirildiğinde, arıtma çamurunun fosfor içeriği de dikkate değerdir. Zira dünya genelinde mineral fosfat rezervlerinin sınırlı olması, bu tür ikincil fosfor kaynaklarının tarımda yeniden kullanımını giderek daha kritik bir konu

hâline getirmektedir. Tarımsal üretimde sürekliliğin sağlanabilmesi için, organik atıklarda bulunan karbonun ve fosforun toprak döngüsüne kazandırılması gerekmektedir (Günay ve Dursun, 2018).

Niksar Belediyesi tarafından arıtma çamurunun bertarafı konusunda değerlendirilen öncelikli senaryo, çevreye duyarlı ve ekonomik bir yaklaşım olan toprakta faydalı kullanımdır. İlçe, tarım arazileri açısından oldukça zengin bir yapıya sahiptir. Yürürlükteki mevzuata uygun biçimde ve gerekli analizlerin ardından, arıtma çamurunun bir bölümünün tarım topraklarında değerlendirilmesi ek bir yönetim seçeneği olarak önerilmiştir.

Niksar Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisi'nde oluşan arıtma çamurunun tarımsal kullanıma uygunluğu, hem çevresel risklerin minimize edilmesi hem de bölgesel ekonomik faydanın maksimize edilmesi açısından olumlu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yapılan analizler, yönetmelik sınırlarına uygunluk gösterdiği için çamurun toprakta kullanılması teknik olarak mümkün görülmektedir. Ancak hijyenik yeterlilik açısından kompostlama veya benzeri stabilizasyon işlemleri uygulanmalıdır.

Arıtma çamuru uygun şekilde işlendikten sonra, hem belediye kontrolündeki alanlarda hem de bölgedeki çiftçiler tarafından toprak iyileştirici madde olarak kullanılabilir. Bu kapsamda, solar kurutma işlemi sonrasında çamurun hacmi önemli ölçüde azalmaktadır; ayrıca bu süreç, çamurun kısmen stabilize olmasına da katkı sağlamaktadır. Ancak, çamurun doğrudan tarımda uygulanabilmesi için yeterli seviyede hijyenizasyon ve stabilizasyon sağlanması gerekmektedir. Özellikle patojen içeriğinin azaltılması amacıyla, stabilizasyon sürecinde kompostlaştırma uygulamasının eklenmesi gerekebilir. Belediye tarafından toprakta kullanım alternatifinin seçilmesi durumunda, tasarımda yer almayan, stabilizasyon için gerekli, kompostlama ünitelerini AAT'ye eklenmesi gerekecektir. Bu durum, belediye için ek yatırım ihtiyacı doğursa da, elde edilen stabil ürünün tarımda güvenle kullanılabilir hâle gelmesi açısından önemlidir.

Solar kurutma sonrası çamurun nem oranı ve hacmi azaldığından, kompostlama süreci daha kısa sürede tamamlanabilmekte; bu sayede gerekli katkı maddeleri, patojen azaltıcılar ve işlem süresi azalmakta, dolayısıyla maliyetler düşmektedir.

Arıtma çamurunun yararlı kullanım amacı ile tarım arazilerinde kullanılması alternatifi ancak güncel mevzuat izin verdiği sürece mümkündür. Politika değişiklikleri, stabilize arıtma çamurunun içeriğinin değişken olması ve kullanılacak toprağın durumu toprakta kullanım alternatifini etkileyecektir. Bu nedenle bu alternatifi sürdürülebilir olması çok zor olacağından, kısa vadede düşünülmesi ve/veya ortaya çıkacak arıtma çamurunun bir kısmı için değerlendirilmesi tavsiye edilir.

Tarımda çamurun kullanımı için, ikna kampanyaları (sağlık açısından yönleri ve tarımsal değeri) ve deneme uygulama alanları bölgesel ve yerel düzeyde gerçekleştirilmelidir. Ayrıca, mevzuata uygun gerekli yönetim tesis edilmelidir (çamur üretim kaydı, kalite kontrol, arazi bankası ve uygulama kadastro, iyi tarım uygulamaları doğrultusunda besin uygulamasının kontrolü).

Niksar özelinde değerlendirildiğinde, arıtma tesisinin çevresindeki tarım alanlarına olan coğrafi yakınlık, çamurun lojistik açıdan sahada uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ancak, bu tür uygulamaların yaygınlaştırılabilmesi büyük ölçüde çiftçilerin arıtma çamuruna yönelik algısı ve kabul düzeyine bağlıdır. Bu nedenle, yerel düzeyde eğitim, teşvik ve güven temelli yaklaşımlar geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Bununla birlikte, çamurun tarımsal kullanımında belediyenin yalnızca teknik değil, aynı zamanda yasal sorumlulukları da bulunmaktadır. Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanımına İlişkin Yönetmelik gereği, belediye; çamurun analiz sonuçlarının izlenmesi, tarım alanlarının düzenli kontrolü ve toprak kalitesinin izlenmesi gibi görevleri yerine getirmekle yükümlüdür. Ayrıca, stabilize arıtma çamurunun tarım arazilerine dağıtımı ve uygulanması süreçleri, ek lojistik ve işletme maliyetleri doğurabilecektir. Bu nedenle, belediye tarafından oluşturulacak planlama sürecinde bu tür maliyet kalemleri ve izleme faaliyetleri de dikkate alınmalıdır.

Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanımına İlişkin Yönetmelik Madde 8’de stabilize arıtma çamuru üreticilerinin arıtma çamurunun toprakta kullanımı için sorumlulukları tanımlanmaktadır:

- Stabilize arıtma çamurunun kullanıma sunulmasından önce, kullanıcıya kullanım izni ile birlikte analiz sonuçlarını içeren belge verilmelidir.
- Stabilize arıtma çamuruna ilişkin düzenli analizler yapılmalı ve bu analizlere dair resmî kayıtlar düzenli şekilde tutulmalıdır.
- Stabilize arıtma çamurunun nasıl kullanılacağına ilişkin, sahaya özel hazırlanmış uygulama talimatı, kullanıcıya yazılı olarak sunulmalıdır.

Tarımda kullanımının yaygınlaştırılması, aşağıdaki gibi destekleyici eylemlerle geliştirilmelidir:

- Toprak analizi ve bakteriyolojik testlerin yapılabilmesi amacıyla, İl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Müdürlüğü ile etkili koordinasyon sağlanmalıdır.
- Stabilize arıtma çamurunun güvenli ve verimli kullanımı hakkında, kullanıcılara yönelik odaklanmış yayım ve eğitim hizmetleri yürütülmelidir.
- Tarımsal ürünlerde ve toprakta ağır metal birikiminin izlenmesi için, ekinlerin ve toprak örneklerinin düzenli olarak test edilmesi sağlanmalı; bu kapsamda çiftçilere teknik destek sunulmalıdır.
- Stabilize arıtma çamurunun sahaya ulaştırılması sürecinde oluşabilecek lojistik maliyetler, çiftçilere yansıtılmaksızın belediye veya kamu kaynaklarıyla karşılanmalıdır.

Stabilize arıtma çamurunun tarımsal kullanımı konusunda çiftçi güveni ve bilinç düzeyinin artırılması, uygulamanın başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda aşağıdaki adımların atılması önerilmektedir:

- İl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Müdürlüğü tarafından onaylanmış ve çiftçilere veya kooperatiflerine dağıtılacak bilgi paketleri hazırlanmalıdır.
- Çiftçilere yönelik yerinde bilgilendirme toplantıları düzenlenmeli; sahaya özgü sorular doğrudan yanıtlanmalıdır.
- Tarlada uygulama sırasında çiftçilerin bilgi alabileceği bir danışma hattı (telefon destek sistemi) kurulmalıdır.

- Sosyal medya ve yerel medya gibi kanallar kullanılarak, öncü kullanıcıların deneyimleri ve geribildirimleri şeffaf biçimde paylaşılmalı, böylece topluluk içi güven oluşturulmalıdır.

Farkındalık eğitimleri ve bilgi materyalleri en az aşağıdaki unsurları içermelidir:

- Stabilize arıtma çamurunun besin içeriği ve toprak iyileştirici faydaları
- İl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Müdürlüğü'nün çiftçilere sağladığı uygulamalı destek hizmetleri
- Toprak ve yeraltı suyu kalitesinin izlenmesi gerekliliği
- Uygulama zamanlaması: Ekimden önce erken ilkbahar veya geç sonbaharda uygulanmalı; hayvan otlatılacak veya yem üretilecek alanlarda uygulama sonrası en az dört hafta süre geçmeden kullanım yapılmamalıdır.
- Uygulama kısıtları: Stabilize arıtma çamuru, çiğ tüketilen ve toprağa temas eden meyve-sebzelerin (örneğin marul, çilek) yetiştirileceği alanlarda kullanılmamalıdır. Meyve ağaçları da bu uygulama dışında tutulmalıdır.
- Farklı mahsul türlerine uygunluk bilgileri (ör. buğday, mısır, yem bitkileri için uygundur)

Belediye tarafından öngörülen toprakta kullanım alternatifi mümkün olmadığı veya Belediye tarafından ek yakıt olarak kabul edecek lisanslı bir tesisin bulunması durumunda ek yakıt olarak arıtma çamurunun bertarafı en uygun yöntem olacaktır.

Belediye tarafından arıtma çamurunun ek yakıt olarak değerlendirilmesi alternatifi benimsendiğinde, çamuru kabul edebilecek lisanslı bir yakma veya enerji geri kazanım tesisine erişim zorunludur. Bu kapsamda, çevre illerdeki (örneğin Ordu–Ünye) ve ilçelerdeki (örneğin Tokat Merkez) tesislerle görüşmeler yapılmalı; arıtma çamuru keklerinin kabulüne ilişkin ön protokoller ve uzun vadeli anlaşmalar sağlanmalıdır.

Bu doğrultuda Niksar Belediyesi, bölgeye yaklaşık 100 km mesafede bulunan Çimento Fabrikası ile ön anlaşmalar çerçevesinde iş birliği geliştirmeyi değerlendirmektedir. Çimento tesisleri, yüksek kalorifik değere sahip alternatif yakıtları klinker üretiminde kullanabilmeleri nedeniyle, arıtma çamurunu enerji geri kazanımı amacıyla kabul edebilecek uygun tesislerdir.

Solar kurutma ünitesi ile elde edilen çamur keklerinin AKM oranı %80'in üzerine çıktığında, çamurun kalorifik değeri artmakta, bu da endüstriyel tesislerde ek yakıt olarak kullanımını teknik olarak mümkün kılmaktadır. Kuru madde içeriği %94,6 olarak ölçülmüş olup, bu oran solar kurutma ünitesinin tasarım hedeflerini başarıyla karşıladığını ve çamurun ek yakıt olarak kullanımı için uygun koşulları sağladığını göstermektedir. Aynı zamanda %68,2 oranında belirlenen organik madde içeriği, çamurun toprak düzenleyici olarak tarımda kullanım potansiyelini de desteklemektedir.

Niksar Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisleri solar kurutma çıkışında elde edilen stabilize çamur, ağır metal ve organik kirleticiler açısından güvenli düzeyde olup, tarımsal kullanım veya ek yakıt olarak değerlendirme açısından uygundur. Ancak E. coli parametresinde sınır değere çok yakın değer ölçülmüş olması nedeniyle, düzenli mikrobiyolojik kontrollerin yapılması ve gerektiğinde ek hijyenizasyon önlemlerinin alınması tavsiye edilmektedir.

Analiz sonuçları, arıtma çamurunun ADDY Ek-2 kapsamında tehlikesiz atık olarak II. sınıf düzenli depolama tesislerine kabul edilebileceğini göstermektedir. Hem toplam ağır metal konsantrasyonlarının II. sınıf sınırların altında kalması hem de toksik karakter göstermemesi, bu çamurun düzenli depolama ile bertarafında yasal ve çevresel bir engel bulunmadığını ortaya koymaktadır.

Atık depolama alanlarında arıtma çamuru kullanımı, arıtma çamuru yönetimi hiyerarşisinde en düşük önceliğe sahiptir ve arıtma çamurun bertaraf edilmesi için başka hiçbir yol bulunmadığında seçilebilir. Özellikle diğer bertaraf seçeneklerinde arızaların ortaya çıktığı aşamalarda, son çare olarak düzenli depolama sağlanmalıdır. Ancak, arıtma çamurlarının düzenli depolama tesislerinde ayrı bir lotta bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Düzenli depolama ile bertaraf alternatifi ancak Belediye mevcut düzenli depolama alanında mevzuat gereğince arıtma çamuru için özel bir lot için anlaşılabilirse mümkün olacaktır. Gerekli lot sağlandığı takdirde, solar kurutma sonrası düşük hacimdeki arıtma çamurunun düzenli depolamada bertarafı kolay uygulanabilir olacaktır. Ancak tesisin uzaklığı ve üretilen çamur miktarı göz önüne alınarak gerekli maliyet hesapları yapılmalıdır.

Arıtma çamurlarının çevreye zarar vermeden bertaraf edilebilmesi ya da sürdürülebilir şekilde yeniden kullanılabilmesi için çeşitli alternatif yöntemler bulunmaktadır. Her bir yöntemin teknik uygunluğu, çevresel etkileri, maliyeti ve mevzuatla uyumluluğu dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Aşağıda, Niksar Belediyesi özelinde değerlendirilen olası nihai kullanım ve bertaraf seçenekleri Çizelge 4.9’da özetlenmiştir

Çizelge 4.9. Arıtma çamurunun nihai kullanım ve bertaraf seçeneklerini değerlendirme tablosu.

Son Kullanım	Durum	Gereklilikler
Toprak Düzenleyici (Tarım, ağaçlandırma, çevre düzenlemesi, arazi ıslahı)	Arıtma çamurunun toprakta kullanımı için mevzuatta belirtilen kirletici sınır değerlerinin karşlanması gereklidir.	Uygulama alanında sıkı izleme ve kalite güvencesi mekanizmaları gereklidir. Toprak ve yeraltı suyu izlenmelidir.Çamur ve türetilmiş ürünlerin analizi için spektroskopi, spektrometri, termal analiz, gravimetri, kromatografi ve elektromigrasyon yöntemleri uygulanmalıdır.
Ek Yakıt (Çimento fabrikaları, kireç tesisleri)	Solar kurutma sonrası %90–95 KM içeriğine ulaşan çamur, döner fırınlar için etkili bir yakıt katkısı olabilir.	Termal kurutma sistemleri, solar kurutmanın yetersiz kaldığı dönemlerde kuruluk derecesini artırmak için gereklidir. Kullanım için lisanslı yakma veya beraber yakma tesisine erişim şarttır.
Nihai Örtü ve Dolgu Malzemesi(Maden sahaları, yangın sonrası çorak alanlar, ıslah çalışmaları)	Biyolojik olarak parçalanabilir atıkların düzenli depolamaya ilişkin sınırlandırmaları, stabilize çamurun bu amaçla kullanılmasını kısıtlayabilir.	Toprak ve yeraltı suyu izleme zorunludur.Uzun vadeli kullanım için kararlılık ve düşük koku gereklidir.
Düzenli Depolama (II. Sınıf)	Başka hiçbir kullanım seçeneği kalmadığında, son bertaraf yöntemi olarak değerlendirilir.	Tehlikesiz atık olarak sınıflandırılması gerekir. %50’nin üzerinde kuru madde içermeli, ön işlem uygulanmış ve stabil hâle getirilmiş olmalıdır.- Ancak mevcut düzenli depolama tesisinde arıtma çamurlarına özel ayrılmış bir lot olmadığından, bu seçenek pratikte uygulanamaz.

Niksar Belediyesi Atık su Arıtma Tesisi'nden elde edilen arıtma çamuru, yapılan fiziksel, kimyasal ve toksikolojik analizler doğrultusunda, Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek 3/B ile Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Ek-2 kapsamında çevresel açıdan güvenli ve mevzuata uygun bir nitelik taşımaktadır. Çamurun ağır metal içerikleri yasal sınırların altında, organik madde oranı ise yüksektir. Toksikite testlerinde balık biyodeneği (ZSF = 8) ve Daphnia magna testleri toksik etki göstermemiştir. Bu sonuçlar, arıtma çamurunun çevreye zarar vermeden çeşitli şekillerde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Yüksek organik karbon ve fosfor içeriği, çamurun özellikle tarım arazilerinde toprak iyileştirici olarak kullanımını cazip hâle getirmektedir. Bu sayede toprak verimliliği artırılabilir, kimyasal gübre kullanımına olan ihtiyaç azaltılabilir ve fosfor gibi sınırlı doğal kaynakların geri kazanımı sağlanabilir. Ancak bu potansiyelin sahaya yansıyabilmesi, çiftçilerin çamur kullanımına yönelik olumlu tutum geliştirmesiyle doğrudan ilişkilidir (Günay ve Dursun, 2018). Bu nedenle bilgilendirme, teşvik ve yerel iş birlikleriyle desteklenmesi önerilmektedir.

Alternatif olarak, kompostlama yöntemi çamurun organik içeriği nedeniyle uygulanabilir bir diğer çevreci seçenek olarak öne çıkmaktadır. Yeniden kullanımın mümkün olmadığı durumlarda ise çamurun II. sınıf düzenli depolama sahalarında kontrollü şekilde bertaraf edilmesi, hem ekonomik hem de yasal açıdan güvenli bir yol sunmaktadır. Yakma yöntemi ise teknik olarak uygulanabilir olmakla birlikte, tesisin ölçeği ve çamur miktarı göz önüne alındığında ekonomik açıdan sürdürülebilir değildir. Bu bağlamda, yakma ancak bölgesel düzeyde entegre bir çamur yönetimi stratejisi içinde değerlendirilmelidir.

Arıtma çamurlarının en ekonomik ve sürdürülebilirliği açısından toprakta kullanımı ülkemizdeki tarım arazilerinin bolluğundan kaynaklı ideal alternatif olarak öne çıksa dahi, çiftçiler tarafından gübre olarak kabulünün yaygınlaşması zaman alabilir, çiftçilerin kullanımı yeterli olmayabilir ve lojistik/taşıma maliyetleri yüksek olabilir. Arıtma çamurunun pratik nihai kullanımının en iyi sonuçları için ek yakıt olarak bertaraf alternatifi değerlendirilmelidir.

Niksar Belediyesi özelinde arıtma çamurunun çevreyle uyumlu, ekonomik ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesi için öncelikli olarak tarımsal kullanım ve

kompostlama, ardından gerektiğinde düzenli depolama, son aşamada ise bölgesel yakma iş birlikleri önerilmektedir.

Sonuç olarak, Niksar AAT tarafından üretilen arıtma çamurunun, mevcut koşullarda çimento fabrikası gibi lisanslı tesislerde enerji geri kazanımı amacıyla bertaraf edilmesi, hem ekonomik hem çevresel yönden orta-uzun vadeli uygulanabilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.



KAYNAKLAR

- Adar, E., 2018. Biyolojik atık su arıtma tesisi çamurlarının süperkritik su gazifikasyonu ile gazlaştırılarak enerji eldesinin araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Çevre Mühendisliği Programı Doktora Tezi , İstanbul.
- Akdemir, U., 2020. Evsel atık su arıtma çamurlarından biyokurutma yöntemi ile yakıt nitelikli ürün elde edilmesinde hacim artırıcı malzemelerin etkinliğinin incelenmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- Akyüz, B., 2020. Endüstriyel arıtma çamurlarının vakum kurutma prosesleri ile kurutma karakteristiklerinin araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- Angın, İ., 2016. Arıtma çamurlarının stabilizasyonuna alternatif bir yaklaşım: vermistabilizasyon, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 2,47, 123-129.
- Aydın, S., 2004. Atık su arıtma tesisi çamurlarının değişik amaçlarla kullanımının araştırılması, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisli Ana Bilim Dalı Doktora Tezi, İstanbul.
- Ayvaz, Z., 2002. Atık su arıtma çamurlarının değerlendirilmesi, Çev Kor, 9,35, 3-12.
- Bayındır, Y., 2021. Büyükbaş hayvan atıklarının kentsel katı atıklarla kompostlaştırılabilirliğinin incelenmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Samsun.
- Council of the European Communities, Directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. (Directive 86/278/EEC), Official Journal L 181, 12.6.1986, 6–12.
- Council of the European Union, Directive concerning urban waste water treatment. (Directive 91/271/EEC), Official Journal L 135, 30.5.1991, 40–52.
- Council of the European Union, Directive on the landfill of waste. (Directive 1999/31/EC), Official Journal L 182, 16.7.1999, 1–19.
- Çelik, İ. B. ve Öner, M., 2003. Atık su arıtma filtre kekinin çimentoda kullanımı. madencilik, 42(2), 11-18.
- Dede, G., 2017. Süs bitkisi toprağında arıtma çamuru stabilizasyonu, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 217-225.
- Dede, Ö. H., 2009. Fındık zürufu ve arıtma çamuru karışımından süs bitki yetiştirme ortamı geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Çevre Mühendisli Ana Bilim Dalı.

- Demir, E. ve Çimrin, K., 2011. Arıtma çamuru ve humik asit uygulamalarının mısırın gelişimi, besin elementi ve ağır metal içerikleri ile bazı toprak özelliklerine etkileri, Tarım Bilimleri Dergisi, 204-216.
- Düzgün, T., 2018. ankara ili evsel atık su arıtma tesislerinden oluşan çamurların nihai bertaraf örneği, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Aksaray.
- Ekinci, M. Ş., 2019. Atık su arıtma çamurlarının bertarafında solar kurutma sisteminin kullanımı, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Elibol, T., 2021. Arıtma çamurlarının Türkiye’deki ve Dünya’daki durumu, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erzurum.
- Ergin, B., 2013. Kayseri ili atık çamuru yönetim alternatiflerinin geliştirilmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Erkaya, O., 2024. Arıtma Çamuru kurutma yöntemlerinin yaşam döngüsü analizi ile karşılaştırılması, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- Ersoy, Ö. ve Özbay, M., 2023. Marmara bölgesinde bulunan organize sanayi bölgelerinin atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının enerji kaynağı olarak kullanımının değerlendirilmesi, Bilim Armoni Dergisi, 6, 1, 64-81.
- Ertemiz, M., 2015. Atıktan türetilmiş yakıt hazırlama tesisleri ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Çevre Bilimleri Ve Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- European Parliament and Council of the European Union, Directive establishing a framework for Community action in the field of water policy (Directive 2000/60/EC), Official Journal L 327, 22.12.2000, 1–73.
- European Parliament and Council of the European Union, Regulation on shipments of waste (Regulation (EC) No 1013/2006), Official Journal L 190, 12.7.2006, 1–98.
- European Parliament and Council of the European Union, Directive on waste and repealing certain Directives (Directive 2008/98/EC), Official Journal L 312, 19.11.2008, 3–30.
- European Parliament and Council of the European Union, Directive on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Directive 2010/75/EU), Official Journal L 334, 17.12.2010, 17–119.

- Gökal, A. C., 2014. Konya organize sanayi bölgesi arıtma çamurlarının ağır metaller açısından incelenmesi ve değerlendirilmesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Gönüldiñ, S., 2006. Birincil çamurun anaerobik çürütülmesinde farklı kinetik modellerin karşılaştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Günay, Ü. ve Dursun, Ş., 2018. Arıtma çamuru ve zirai atıkların kompostlanarak tarım arazilerinde kullanımı, Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 1(1), 14-19.
- Hanay, Ö. ve Hasar, H., 2007. Kayseri ili kentsel atık su arıtma tesisi çamurlarının tarımsal amaçlı kullanım potansiyeli, Fırat Üniv. Fen Ve Müh. Bil. Dergisi, 333-337.
- İrdemez, Ş., 2016. Evsel atık su arıtma çamurlarının termal kurutma-yakma prosesi ile uzaklaştırılmasında arıtma verimi-enerji ilişkisinin incelenmesi, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 65-73.
- İşçi, S., 2006. Arıtma çamurlarının özellikleri ve arazide değerlendirme imkânlarının araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi Ankara.
- Kalkan, F. C., 2010. Arıtma çamurlarında reolojik karakterizasyonun belirlenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Kaya, A., 2012. An inventory study for municipal sludge production in aegean region, Dokuz Eylül University Graduate School Of Natural And Applied Sciences Natural And Applied Sciences. İzmir.
- Metik, A., 2018. Zeytin atığının arıtma çamuru ile karıştırılıp kurutulması ve peletlenerek yakılmasından oluşan külün inşaat malzemesi olarak değerlendirme olanaklarının incelenmesi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Tarımsal Yapılar Ve Sulama Anabilim Dalı, Aydın.
- Miranzadeh, M. B., Jafarsalehi, M., Akram, J., Ebrahimi, M., Mazaheri, A. ve Mashayekh, M., (2024). Optimizing biogas production in the wastewater treatment plants: A narrative review on co-digestion of sewage sludge with internal and external organic waste. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101856.
- Mitraka, G.-C., 2024. Evaluation of the optimal sewage sludge pre-treatment technology through continuous reactor operation: process performance and microbial community insights, *Water Research* 257.
- Mut, B., 2017. Arıtma çamurundan biyogaz üretim verimine pektin-nanokompozit ve aktif karbonun (Ac) etkisinin araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam

Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş.

Niksar Belediyesi, (2024). Niksar Belediyesi Arıtma Tesisi fizibilite raporu.

Ordu, Ş. ve Öztürk, E., 2017. Çimento fabrikalarında alternatif hammadde ve yakıt kullanımı: örnek çalışma, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 87-92.

Özalp, F. N., 2005. Ankara Aski atık su özellikleri ve arıtma sisteminin değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Özbek, B., 2022. Arıtma çamurlarının farklı hayvan gübreleri ile birlikte kompostlanabilirliğinin araştırılması, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Özen, A., 2023. Kastamonu atık su arıtma tesisi solar çamur kurutma sisteminin incelenmesi ve bertaraf önerileri, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisan Tezi, Kastamonu.

Öztürk, E., 2016. Çimento sektöründe alternatif hammadde ve alternatif yakıt kullanımının çevresel yararlarının değerlendirilmesi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.

Özyazıcı, M. A. ve Özyazıcı , G., 2012. Arıtma çamurunun toprağın bazı temel verimlilik parametreleri, Anadolu Tarım Bilim Dergisi, 27, 2, 101-109.

Şağban, F. O. ve Demir, E., 2020. Evsel ve evsel nitelikli arıtma çamurlarının toprak düzenleyici etkisinin değerlendirilmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 589-597.

Şenkaya, E. M., 2020. Atık su arıtma çamurlarının solucanlar (eisenia fetida) ile kompostlanarak bünyelerindeki ağır metalin giderilmesi, Karabük Üniversitesi Çevre Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Karabük.

T.C. Resmî Gazete, Atık Yönetimi Yönetmeliği. (29314), 02.04.2015.

T.C. Resmî Gazete, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. (27533), 26.03.2010.

T.C. Resmî Gazete, Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik. (27721), 06.10.2010.

T.C. Resmî Gazete, Atık su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği. (27527), 20.03.2010.

T.C. Resmî Gazete, Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik. (27661), 03.08.2010.

- T.C. Resmî Gazete, Kentsel Atık su Arıtımı Yönetmeliği. (26047), 08.01.2006.
- T.C. Resmî Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. (25687), 31.12.2004.
- T.C. Resmî Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. Numune Alma ve Analiz Metotları Tebliği, Ek-1 Tablo 1. (27372), 10.10.2009.
- T.C. Resmî Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği İdari Usuller Tebliği. (27372), 10.10.2009.
- T.C. Resmî Gazete, Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik. (27605), 08.06.2010.
- Topaç, F. O., ve Uçaroğlu, S., 2020. Atık su arıtma çamurlarının sürdürülebilir kullanım alternatifleri:öncelikli yaklaşımlar, Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi(20), 728-739.
- Türkmenler, H., 2019. Seyhan atık su arıtma tesisi'nde biyogaz üretim verimliliğinin araştırılması, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 95-101.
- Uzun, P., ve Bilgili, U., 2011. Arıtma çamurlarının tarımda kullanılma olanakları, Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 135-146.
- Ünlü, H. I., 2020. Evsel atık su arıtma çamurlarının açık ve kapalı solar kurutma yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisan Tezi, Isparta.
- Yüksekdağ, M., Gökpınar, S. ve Yelmen, B., 2020. Atık su arıtma tesislerinde arıtma çamurları ve bertaraf uygulamaları, Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi 18, 895-904.
- URL-1 <<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570>>, Erişim tarihi: 09.01.2025.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Yeşim ÖGÜD

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü,
2008-2012

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, .
2013-2025

: Kapadokya Üniversitesi, Öğretim ve Araştırma Enstitüsü,
Kent Çevre ve Yerel Yönetimler 2021-2022

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

- 2013 – 2014 Çevre Mühendisi – UDH Çevre Danışmanlık, Tokat Çevre danışmanlık firması bünyesinde çevre görevlisi olarak görev yaptı.
- 2014 – 2016 Çevre Mühendisi – Niksar Belediyesi, Tokat Çevre Koruma ve Kontrol Müdürlüğü’nde çevre mühendisi olarak görev aldı.
- 2016 – 2021 Temizlik İşleri Müdürü – Niksar Belediyesi, Tokat Park ve bahçeler, çevre koruma, ilaçlama ve geçici hayvan bakım evi gibi birimlerden sorumlu Temizlik İşleri Müdürlüğü görevini yürüttü.
- 2021 – 2023 Atık su Arıtma Tesisi Sorumlusu – Niksar Belediyesi, Tokat AB IPA-2 Projesi kapsamında yapımına başlanan, 12.500 m³/gün kapasiteli, azot-fosfor giderimli ileri biyolojik atık su arıtma tesisinin inşaatından itibaren sorumlu olarak görev yaptı.
- 2024 –İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Müdürü – Niksar Belediyesi, Tokat İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Müdürlüğü görevini yürütmekte olup, aynı zamanda Atık su Arıtma Tesisi işletmesini de sürdürmektedir.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Baştürk, E. ve Ögüd, Y., 2024. Atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının değerlendirilmesi, 7th International Agriculture, Environment and Health Congress , Bursa, ICAEH Bildiri Kitabı, 574–581.