

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**AĞIR METALLERİN ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDEKİ GİDERİM VE
AKİBETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ayşegül KEYİKOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**AĞIR METALLERİN ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDEKİ GİDERİM VE
AKİBETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ayşegül KEYİKOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2019

ANTALYA

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

**AĞIR METALLERİN ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDEKİ GİDERİM VE
AKİBETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Ayşegül KEYİKOĞLU
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**(Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-
2018-3394 nolu proje ile desteklenmiştir.)**

HAZİRAN 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞIR METALLERİN ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDEKİ GİDERİM VE
AKİBETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ayşegül KEYİKOĞLU
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

Bu tez 24/06/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Çiğdem MORAL (Danışman)

Dr. Öğr. Ü. Firdes YENİLMEZ

Doç. Dr. Emine ELMASLAR ÖZBAŞ

ÖZET

AĞIR METALLERİN ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDEKİ GİDERİM VE AKİBETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ayşegül KEYİKOĞLU

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Çiğdem MORAL

Haziran 2019; 105 Sayfa

Ağır metaller düşük dozlarda dahi zehirli etki göstermeleri ve biyolojik parçalanmaya dayanıklılıkları sebebiyle önemli su kirleticileridir. Bu metaller, özellikle büyük şehirlerde, yerleşim alanlarından ve organize sanayi bölgelerinden kaynaklanan atıksularda bulunmakta ve sonuçta kentsel atıksu arıtma tesislerine arıtmak üzere iletilmektedir. Kentsel atıksu arıtma tesisleri esasen organik kirleticilerin giderimi için tasarlanmış olup ağır metal giderimi için uygun arıtma prosesleri içermezler. Dolayısıyla kentsel atıksu arıtma tesislerinde arıtılan atıksular alıcı ortamı tehdit etmektedir ve tesislerde çıkış suyunun yanında çamur da üretilmektedir. Bu çamur içerisinde yoğunlaşan ağır metaller de nihai kullanımına bağlı olarak, örneğin tarımda kullanım gibi, problemler oluşturabilmektedir. Bu nedenlerle tesislerdeki metallerin miktar, dağılım ve akıbetlerinin belirlenmesi sucul ekosistemin ve insan sağlığının korunması açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, kentsel atıksu arıtma tesislerinde sıvı ve katı fazdaki ağır metal içeriklerini izleyerek mevcut arıtım proseslerinin ağır metal giderim performanslarını incelemek ve ağır metallerin atıksu arıtma tesislerindeki davranışlarını değerlendirmektir. Bu amaçla Antalya'daki en büyük arıtma tesisi olan Hurma Atıksu Arıtma Tesisi seçilmiştir. İlgili tesiste bir yıl boyunca üç aylık periyotlarla tesisin giriş ve çıkışından kompozit, ara ünitelerinden anlık atıksu numuneleri ile çamur numuneleri toplanmıştır. Bu numuneler, mikrodalga ile çürütülmüş ve ICP-MS kullanılarak Cd, Hg, Pb, Ni, Cu, Zn, As, Cr metalleri için analiz edilmiştir.

Ham atıksudaki metallerin yıllık ortalama konsantrasyon sıralaması $As < Hg < Cr < Cd < Ni < Cu < Pb < Zn$ şeklinde, çıkış akımındaki metallerin yıllık ortalama konsantrasyon sıralaması ise $As < Cr < Hg < Ni < Cu < Cd < Pb < Zn$ şeklindedir. Bu durumda, en yüksek metal konsantrasyonuna sahip Zn olurken en düşük metal konsantrasyonu As'de görülmüştür. Yüksek Zn ve Pb konsantrasyonları Antalya'daki yaygın tarım faaliyetleri (gübre ve pestisit kullanımı) ile ilişkilendirilebilir. Tesiste en düşük giderim verimi Cd ve As'de (sırasıyla %21 ve 24), en yüksek giderim verimi ise Cu, Pb ve Cr'de (sırasıyla %75, 75, 71) gözlenmiştir. Bu çalışmada takip edilen metallerin yıllık kütsel yükü Avrupa standartlarına göre (EC, 166/2006) limit değerlerin üzerindedir. Diğer yandan susuzlaştırılmış çamurdaki en yüksek metal konsantrasyonları Zn ve Cu'da iken en düşük metal konsantrasyonları Hg ve daha sonra Cd'de gözlenmiştir. Susuzlaştırılmış çamur kalitesi, tarımda kullanım için, ağır metaller açısından Türkiye'de uygulanan düzenlemelere göre sınırların içerisinde, ancak tesiste ileri arıtma ile azot ve fosfor

giderimi de gerçekleştirildiğinden ilgili tesise ait çamurların toprağa uygulanması çok da verimli olmayabilir.

ANAHTAR KELİMELELER: Antalya, Arıtma amuru, İzleme, Öncelikli kirleticiler, Toksisite

JÜRİ: Do. Dr. iėdem MORAL

Do. Dr. Emine ELMASLAR ÖZBAŞ

Dr. Öğr. Üyesi Firdes YENİLMEZ



ABSTRACT

EVALUATION OF REMOVAL AND FATE OF HEAVY METALS IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Ayşegül KEYİKOĞLU

MSc Thesis in Environmental Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çiğdem MORAL

June 2019; 105 Pages

Heavy metals are important water pollutants since they have toxicity even at low doses and they are resistant to biodegradation. These metals, particularly in large cities, are found in wastewaters originated from residential areas and organized industrial zones and finally reached to municipal wastewater treatment plants for treatment. Municipal wastewater treatment plants are principally designed for organic pollutants removal, consist of treatment processes which are not suitable for heavy metal treatment. Therefore, effluents from municipal wastewater treatment plants threaten receiving water bodies and besides effluent stream, also, sludge is produced in these plants. Depending on final application, for example agricultural use, heavy metals concentrated in these sludges may lead problems. For these reasons, it is important to determine the amount, distribution and fate of the metals from the point of aquatic ecosystem and human health protection.

The purpose of this study is to determine behaviors of heavy metals in wastewater treatment plants and to examine heavy metals removal efficiencies of existing treatment processes by monitoring liquid and solid phase heavy metals contents of municipal wastewater treatment plants. For this purpose, Hurma Wastewater Treatment Plant, which is the biggest treatment plant in Antalya, is selected. During one year every three months, composite wastewater samples from influent and effluent of the plant, grab wastewater samples from intermediate units and sludge samples were collected. These samples were digested by microwave and analysed for Cd, Hg, Pb, Ni, Cu, Zn, As, Cr metals by ICP-MS.

Average yearly relative abundance of the metals in raw wastewater is $As < Hg < Cr < Cd < Ni < Cu < Pb < Zn$ while average yearly relative abundance of the metals in the effluent is $As < Cr < Hg < Ni < Cu < Cd < Pb < Zn$. In that case, Zn has the highest heavy metal concentration whereas As has the lowest heavy metal concentration. High Zn and Pb concentrations may be attributed to extensive agricultural activities (use of pesticides and fertilizers) in Antalya. The lowest removal rates for Cd and As (21 and 24%, respectively), the highest removal rates for Cu, Pb and Cr (75, 75 and 71 %, respectively) were observed in the plant. According to the European standards (EC 166/2006), yearly mass load of heavy metals followed in this study exceeds the limit values. On the other hand, the highest metal concentrations in dewatered sludges were Zn and Cu whereas the lowest metal concentrations were observed for Hg and then Cd. Dewatered sludge quality in terms of heavy metals content for agricultural use is within the limits according to the regulations applied in Turkey, however, the sludges of related plant may not be efficient

for land application since nitrogen and phosphorus removal is obtained by tertiary treatment in the plant.

KEYWORDS: Antalya, Monitoring, Priority pollutants, Sludge, Toxicity

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Çiğdem MORAL

Assoc. Prof. Dr. Emine ELMASLAR ÖZBAŞ

Asst. Prof. Dr. Firdes YENİLMEZ



ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince, değerli bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle elinden gelenden fazlasını sunan, ayrıca göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam Doç. Dr. Çiğdem MORAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın değerlendirilmesinde kritik ve önemli yorumlarından dolayı tez jürilerim Dr. Öğr. Üyesi Firdes YENİLMEZ ve Doç. Dr. Emine ELMASLAR ÖZBAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında aletlerin ve laboratuvarlarının paylaşımı hususunda gösterdikleri özen nedeniyle Dr. Öğr. Üyesi Ayça ERDEM'e ve Dr. Öğr. Üyesi Güray DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Numune alımlarında yardımcı olan değerli ASAT çalışanları Çevre Mühendisi Aysun ÇAKIR ve Çevre mühendisi Faikcan AFŞEÖREN'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatıma girdiği andan itibaren her zaman yanımda olan ve tez çalışmam süresince de beni yalnız bırakmayan, analizlerimin yapılmasında yardımcı olan, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen çok değerli eşim Arş. Gör. Ramazan KEYİKOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Ağır Metaller	4
2.1.1. Ağır metallerin kullanım alanları ve çevreye yayılımı	4
2.1.2. Ağır metallerin canlılara ve çevreye olan etkileri.....	5
2.2. Atıksu Arıtma Tesisleri ve Ağır Metaller.....	11
2.2.1. Atıksu arıtma tesisine gelen ağır metal kaynakları.....	11
2.2.2. Atıksu arıtma tesisi giderim aşamaları	14
2.2.3. Atıksulardan ağır metallerin gideriminde kullanılan metotlar.....	17
2.3. Atıksu Arıtma Tesislerinde Ağır Metallerin Akıbeti: Literatür Taraması	20
2.3.1. AAT’lerde metallerin hamsudaki konsantrasyonu ve giderim performansı.....	22
2.3.2. AAT’lerde metallerin giderim mekanizmaları	24
2.3.3. Arıtma aşamalarında metallerin dağılımı	24
2.3.4. AAT çamurlarının kalitesi ve ağır metaller	25
2.3.5. Ağır metallerin farklı fazlardaki dağılımları.....	26
2.4. Yasal Uygulamalar	27
2.4.1. Ulusal bazdaki yasal düzenlemeler.....	32
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1. Çalışma Alanı	35
3.1.1. Antalya ili genel özellikleri	35
3.1.2. Hurma Atıksu Arıtma Tesis.....	35
3.2. Numunelerin Toplanması	39
3.3. Numunelerin Ağır Metal Ölçüm Ön Hazırlık İşlemleri	39
3.4. Numunelerde Temel Parametrelerin Analizleri	42
4. BULGULAR.....	43

4.1. Hurma AAT'nin Genel Arıtım Parametreleri	43
4.2. Hurma AAT'deki Arıtma Aşamalarındaki Ağır Metal Konsantrasyonları ve Giderim Verimi.....	43
4.2.1. Yaz dönemi ağır metal konsantrasyonları	44
4.2.2. Yaz döneminde ağır metal giderim verimi	48
4.2.3. Sonbahar dönemi ağır metal konsantrasyonları.....	49
4.2.4. Sonbahar dönemi ağır metal giderim verimi	54
4.2.5. Kış dönemi ağır metal konsantrasyonları	54
4.2.6. Kış dönemi ağır metal giderim verimi.....	59
4.2.7. İlkbahar dönemi ağır metal konsantrasyonları	59
4.2.8. İlkbahar dönemi ağır metal giderim verimi	65
5. TARTIŞMA	66
5.1. Sıvı Fazdaki Metallerin Mevsimsel Karşılaştırması	66
5.2. Sıvı Fazdaki Metallerin Literatür Karşılaştırılması.....	69
5.3. Katı Fazdaki Metallerin Mevsimsel Karşılaştırılması.....	74
5.4. Katı Fazdaki Metallerin Literatür Karşılaştırılması	75
5.5. Arıtım Aşamalarındaki Metallerin Davranışları.....	77
6. SONUÇLAR	85
7. KAYNAKLAR	87
8. EKLER.....	92
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ağır Metallerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Giderim ve Akıbetinin Değerlendirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../.....

Ayşegül KEYİKOĞLU



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% : Yüzde

As : Arsenik

Cd : Kadmiyum

Cu : Bakır

Cr : Krom

Hg : Civa

kg/yıl : Kilogram/Yıl

mg/kg : Miligram/Kilogram

mg/L : Miligram/Litre

Ni : Nikel

ppb : Milyarda bir

Pb : Kurşun

Zn : Çinko

µg/L : Mikrogram/Litre

µg/kg : Mikrogram/Kilogram

Ondalık rakamlar virgülle belirtilmiştir.

Kısaltmalar

AA : Yıllık Ortalama.

AAT : Atıksu Arıtma Tesisi

AÇP : Aktif Çamur Prosesi

AKM : Askıda Katı Madde

CAS : Chemical Abstracts Service

ÇKS : Çevresel Kalite Standartları
EHA : Evsel Ham Atıksu
EUWFD: Avrupa Su Çerçeve Direktifi
GDA : Geri Devir Atıksu
KHA : Karışık Ham Atıksu
KM : Kuru Madde
KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MAC : İzin Verilen Maksimum Konsantrasyon
ÖÇÇ : Ön Çöktürme Çamuru
SÇ : Susuzlaştırılmış Çamur
SÇÇ : Son Çöktürme Çamuru
TLA : Tespit limiti altı
USEPA: Amerikan Çevre Koruma Ajansı
WSP : Atık stabilizasyon havuzu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Şematik olarak ağır metallerin doğaya yayılımları.....	5
Şekil 2.2. Atıksu arıtma tesislerine giren metallerin kaynakları	12
Şekil 2.3. Atıksu arıtma tesisi akım şeması	14
Şekil 3.1. Antalya ili coğrafi haritası	35
Şekil 3.2. Hurma AAT yerleşim yeri	36
Şekil 3.3. Hurma AAT genel yerleşim planı.....	36
Şekil 3.4. Hurma AAT akım şeması ve numune alma noktaları	39
Şekil 3.5. Mikrodalga çürütme sistemi	40
Şekil 3.6. (a) Digestion tüplerindeki numuneler (b) Numunelere asit ekleme.....	41
Şekil 4.1. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu.....	44
Şekil 4.2. Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu	45
Şekil 4.3. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu	45
Şekil 4.4. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu.....	46
Şekil 4.5. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu.....	47
Şekil 4.6. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu	47
Şekil 4.7. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu.....	48
Şekil 4.8. Hurma AAT'de yaz dönemi ağır metal giderimi	48
Şekil 4.9. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu.....	49
Şekil 4.10. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Hg konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Hg konsantrasyonu	50
Şekil 4.11. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Ni konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu	50

Şekil 4.12. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu	51
Şekil 4.13. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu.....	52
Şekil 4.14. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu.....	52
Şekil 4.15. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu	53
Şekil 4.16. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu.....	53
Şekil 4.17. Hurma AAT'de sonbahar dönemi ağır metal giderimi	54
Şekil 4.18. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu.....	55
Şekil 4.19. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Hg konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Hg konsantrasyonu	55
Şekil 4.20. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Ni konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu	56
Şekil 4.21. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu	57
Şekil 4.22. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu.....	57
Şekil 4.23. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu.....	58
Şekil 4.24. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu	58
Şekil 4.25. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu.....	59
Şekil 4.26. Hurma AAT'de kış dönemi ağır metal giderimi	60
Şekil 4.27. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu.....	61
Şekil 4.28. Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Hg konsantrasyonu	61
Şekil 4.29. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Ni konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu	62

Şekil 4.30. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu	62
Şekil 4.31. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu.....	63
Şekil 4.32. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu.....	63
Şekil 4.33. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu	64
Şekil 4.34. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu.....	64
Şekil 4.35. Hurma AAT'de ilkbahar dönemi ağır metal giderimi.....	65
Şekil 5.1. İlkbahar dönemi metallerin dağılımı (a) hamsu; (b) ön çöktürme atıksu; (c) son çöktürme atıksu; (d) çıkış atıksu; (e) ön çöktürme çamuru; (f) son çöktürme çamuru; (g) susuzlaştırılmış çamur	81
Şekil 5.2. Yaz dönemi metallerin dağılımı (a) hamsu; (b) ön çöktürme atıksu; (c) son çöktürme atıksu; (d) çıkış atıksu; (e) ön çöktürme çamuru; (f) son çöktürme çamuru; (g) susuzlaştırılmış çamur	82
Şekil 5.3. Sonbahar dönemi metallerin dağılımı (a) hamsu; (b) ön çöktürme atıksu; (c) son çöktürme atıksu; (d) çıkış atıksu; (e) ön çöktürme çamuru; (f) son çöktürme çamuru; (g) susuzlaştırılmış çamur	83
Şekil 5.4. Kış dönemi metal dağılımı (a) hamsu; (b) ön çöktürme atıksu; (c) son çöktürme atıksu; (d) çıkış atıksu; (e) ön çöktürme çamuru; (f) son çöktürme çamuru; (g) susuzlaştırılmış çamur	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Temel endüstrilerden atılan ağır metal türleri	4
Çizelge 2.2. Önemli ağır metallerin ekolojik sınıflaması	6
Çizelge 2.3. Kentsel atıksu sistemlerine farklı kaynaklardan gelen metallerin karşılaştırılması	13
Çizelge 2.4. Literatürde incelenen AAT'lere ait temel bilgiler	20
Çizelge 2.5. Literatürdeki arıtma aşamalarındaki ağır metal konsantrasyonları	28
Çizelge 3.1. Hurma AAT giriş ve çıkış suyu parametre değerleri.....	37
Çizelge 4.1. Hurma AAT'nin genel arıtım parametreleri.....	43
Çizelge 5.1. Sıvı fazdaki metallerin mevsimsel karşılaştırması	68
Çizelge 5.2. Sıvı fazdaki metallerin literatür karşılaştırması	71
Çizelge 5.3. Katı fazdaki metallerin mevsimsel karşılaştırılması.....	76
Çizelge 5.4. Katı fazdaki metallerin literatür karşılaştırması	78
Çizelge 8.1. Topraktaki ağır metal konsantrasyonları için sınır değerleri	94
Çizelge 8.2. Tarımda kullanım için çamurdaki ağır metal konsantrasyonlarındaki sınır değerler.....	94
Çizelge 8.3. Tarım arazisine on yıllık ortalama esas alınarak yıllık verilmesine müsaade edilecek ağır metal sınır değerleri	94
Çizelge 8.4. Arıtma çamurunun arazi uygulamasındaki üst limitler	95
Çizelge 8.5. Tarımsal arazi, orman, halka açık bölgeye veya bertaraf alanına arıtma çamurunun uygulamasında kirleticilerin kümülatif yükleme oranı	95
Çizelge 8.6. Tarımsal arazi, orman, halka açık bölgeye veya bertaraf alanına arıtma çamurunun uygulamasında her bir kirleticinin arıtma çamurundaki konsantrasyonu	95
Çizelge 8.7. Toprakta uygulanacak çamurun yıllık yükleme oranı	96
Çizelge 8.8. Çok tehlikeli maddeler ve bunlara ait özel hükümler.....	100
Çizelge 8.9. Daha az tehlikeli maddeler	100
Çizelge 8.10. Topraktaki ağır metal sınır değerleri	103
Çizelge 8.11. Toprakta kullanılabilecek stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek maksimum ağır metal muhtevaları.....	103

Çizelge 8.12. Toprakta on yıllık ortalama esas alınarak bir yılda verilmesine müsaade edilecek ağır metal yükü sınır değerleri	103
---	-----



1. GİRİŞ

Ağır metaller, yoğunluğu 5.0 g/cm^3 'den büyük olan elementlerdir (Chipasa, 2003). Bu metaller pek çok organik kirletici gibi biyolojik olarak parçalanamadıklarından dolayı canlı organizmalarda birikim eğiliminde olmasıyla ve toksik etkileri nedeniyle çevre için önemli ölçüde kirlilik unsurudur. Özellikle nehirlerde ve sulu ortamlarda birikmesi hem sucul yaşamı olumsuz yönde etkilemekte hem de besin zinciri içerisinde insan sağlığını tehdit etmektedir (Fu ve Wang, 2011; Dinç ve Yılmaz, 2013). Ağır metaller, insan sağlığı ve çevre için endişe kaynağı olduğu gibi aynı zamanda mikrobiyal aktiviteyi olumsuz yönde etkilediği için biyolojik atıksu arıtma prosesleri için de sorun oluşturabilmektedir (Oliveira vd., 2007; Üstün, 2009). Örneğin ağır metallerin nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemlerini inhibe ettiği rapor edilmiştir (Chipasa, 2003).

Ağır metallerin kullanım alanları oldukça geniştir ve bir kısmı bilinçli bir kısmı bilinçsiz olarak çevreye deşarjları her geçen gün artmaktadır. Atıksu arıtma tesislerine ağır metaller sadece endüstriyel atıksu olarak değil aynı zamanda evsel kaynaklı atıksularla ve yüzey akışıyla da gelmektedir. Evsel kullanımlara deterjanlar, gıda ürünleri, kozmetik ürünleri, boyalar ve paslanmış borulardan gelen sular örnek olarak verilebilir. Kentsel yüzeysel akış ile çatılardan bakır, araba yıkamalarından çinko kanalizasyona karışmaktadır. Ayrıca, tekstil ve motor yağı sanayileri, metal kaplama tesisleri, madencilik işlemleri, gübre ve zirai ilaç endüstrileri, tabakhaneler, pil ve akümülatör üretim proseslerinin de aralarında bulunduğu çeşitli endüstrilerin üretimleri sonucu oluşan atıksularda özellikle endişe duyulan zehirli ağır metaller; çinko, bakır, nikel, civa, kadmiyum, kurşun ve krom olarak sayılabilir (Chipasa, 2003; Fu ve Wang, 2011).

Evsel atıksu arıtma tesisleri genellikle nütrient/organik giderimi için tasarlanmış olup yurdumuz da dahil pek çok ülkede çoğunlukla aktif çamur prosesi kullanılmaktadır (Karvelas vd., 2003). Bu nedenlerle özellikle kanalizasyona bağlanan endüstriyel atıksu girişleri de düşünüldüğünde bu atıksu arıtma tesisleri ağır metal giderimine uygun değildir (Üstün, 2009). Atıksu arıtma tesislerinde nihai ürün sadece atıksu değil aynı zamanda çamur da bir nihai üründür. Ayrıca ağır metallerin atıksudan bir miktar giderildiği düşünülse de aslında ağır metallerin konsantre olarak arıtım sırasında oluşan çamura geçtiği bilinmektedir. Nihai çamurun imhası için en çok kullanılan yöntemlerden birisi arazide gübre olarak kullanımıdır. Bu sebeple çamur kalitesi de atıksu kalitesi kadar önemli bir konudur.

Atıksu arıtma tesislerindeki ağır metallerin kaynakları ve tesisteki akışının kapsamlı bir şekilde araştırılması çevre üzerindeki etkisini en aza indirmek için önemlidir. Yeni arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi, etkili bir atıksu arıtımının gerçekleştirilmesi ve üretilen çamurun yönetimi için çözümler geliştirilmesi için özellikle giriş – çıkış atıksu ve çamur karakteristiklerini izlemek gerekir (Salihoglu, 2013). AB ülkelerinde, 2000 yılından bu yana, Avrupa Su Çerçeve Direktifi (EUWFD)'nin ve en son geliştirilen 2013/39/AB Yönergesinin uygulanması, atıksu arıtma tesislerinde metallerin giderilmesi konusunda daha sıkı düzenlemeler getirmiştir. EUWFD'nin son güncellemesinde, Çevresel Kalite Standartlarını (ÇKS) karşılamak ve dolayısıyla yakın gelecekteki tüm yüzeysel su ve yeraltı suları için iyi bir duruma ulaşmak için çevreye verilen emisyonlarının (öncelikli tehlikeli maddeler) ortadan kaldırılması veya azaltılması zorunda olan 45 öncelikli kirletici listelenmiştir (EC,2013 Ek -II). Cd, Hg, Ni ve Pb öncelikli kirleticiler arasında yer almaktadır. As, Cu, Cr ve Zn gibi diğer metaller de

gelecekte potansiyel olarak öncelikli maddeler haline gelebilecek ek maddeler listesinde yer almaktadır (Cantinho vd., 2016). Ülkemizde de dünyadaki gelişmelere paralel olarak yasal mevzuattaki eksiklikler, SKKY ve bu konuyla ilgili tebliğ ve diğer yönetmeliklerle giderilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca ABD Temiz Su Yasası'nın ve AB Su Çerçeve Direktifinin Türkiye'de uygulanabilirliği üzerine çalışmalar da devam etmektedir.

Atıksu arıtma tesislerinde ağır metallerin giderim ve akıbeti üzerine yapılmış mevcut çalışmalarda oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle ham sudaki ağır metal konsantrasyonlarındaki farklılıkların sebebinin, atıksu arıtma tesislerine atıksuyun farklı kaynaklardan gelmesi olabilir. Carletti vd., (2008), İtalya'daki farklı endüstriyel faaliyetlerden atıksu girdilerine sahip beş büyük atıksu arıtma tesisinde ağır metallerin akıbeti ve oluşumlarını incelemiştir. Bazı metaller için benzer endüstriyel girdiye sahip tesisler arasında bile ciddi farklılıklar olduğunu bulmuşlardır. Oliveira vd., (2007), Ribeirão Preto Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi 'nin giriş ve çıkış akımındaki ağır metallerin varlığını ve aynı zamanda atıksudaki ve çamurdaki ağır metal içeriğini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, atıksuyun metal bileşiminin karışık ve son derece değişken olduğunu belirlemiştir. Bunun sebebinin de Ribeirão Preto bölgesinin ekonomik faaliyetlerinin çeşitliliği ile ilgili olabileceğini düşünmüşlerdir. Metal seviyelerindeki değişimlere bakıldığı zaman da Cu, Hg ve Zn seviyelerindeki değişimlerin Cd, Mn ve Pb'dekinden daha büyük olduğu görülmüştür. Mn'deki değişim de Cd ve Pb'ye göre dikkate değer olduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar Chipasa (2003)'nin yapmış olduğu çalışmada elde edilmiştir. Bu çalışmada Polonya'daki Gdansk Atıksu Arıtma Tesisindeki ağır metallerin giderimi ve birikimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Oliveira vd., (2007)'nin sonuçlarına benzer olarak Cu ve Zn içeriklerindeki değişimler Cd ve Pb içeriklerindeki değişimlerden daha belirgin olmuştur. Ayrıca, ağır metal giderimi atıksu giriş suyundaki başlangıç miktarlarıyla orantılı ve giriş suyu içeriklerine karşılık olarak ağır metal içeriğindeki azalma $Cd < Pb < Cu < Zn$ şeklinde olmuştur. Çürümüş çamurdaki ağır metal içeriğindeki artış ise $(Zn < Pb < Cu < Cd)$ giriş atıksuyundaki giderimin tersi olmuştur. Karvelas vd., (2003)'nin yapmış olduğu çalışmada Selanik şehrinin atıksu arıtma tesisindeki ağır metallerin varlığı ve akıbeti araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, arıtılmış atıksudaki ve çamur akışlarındaki ağır metallerin dağılımı, Mn ve Cu'nun ($>70\%$) çamurda biriktiğini gösterirken, Cd, Cr, Pb, Fe, Ni ve Zn'nin $47-63\%$ 'ünün arıtılmış çıkış akımında kaldığını göstermiştir.

Ulusal bazlı çalışmalar incelendiğinde ise atıksu arıtma tesislerindeki ağır metal giderimi ve akıbeti üzerine çok az sayıda çalışmaya rastlanılmıştır. Salihoglu (2013), Bursa'daki biyolojik nütrient giderme (Beş aşamalı bir Bardenpho) prosesi ile faaliyet gösteren iki ana atıksu arıtma tesisi ile klasik aktif çamur sistemlerinin ağır metal giderim verimlerini karşılaştırmıştır. Her iki atıksu arıtma tesisinin giriş akımında en bol bulunan metaller toplam Fe ve Al iken en az bulunan metaller ise As, Pb, Ni, Cu, Cd olmuştur. Çalışmanın sonuçlarına göre toplam Cr, toplam Fe, Al ve Cu için 75% 'in üstünde giderim verimliliği elde edilirken, As, Cd, Pb, Sb ve Sn için önemli bir giderim gözlenmemiştir. Kaynak ve Taşdemir (2003) de Bursa'daki bu iki atıksu arıtma tesisindeki anaerobik stabilizasyon havuzlarında 14 farklı ağır metalin giderim verimini araştırmışlardır. Bu 14 metal için ortalama giderim verimleri 7% ile 65% arasında değişmiştir. Anaerobik stabilizasyon havuzlarında başlıca ağır metal giderim mekanizmasının partiküler formdaki metallerin çökmesi ile gerçekleştiği belirlenmiştir. Üstün (2009) ise ağır metallerin giderim verimlerinin değerlendirilmesi ve çıkış suyunun alıcı ortama olan

etkisinin belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre de stabilizasyon havuzlarında, giderim verimi Cr için %58 iken Cd, Mn ve Pb için %20'den az olmuştur. Aktif çamur prosesinde ise Ni için %47 ve Cr için %95 kadar yüksek giderim verimliliği elde edilmiştir.

Özetle, literatürde incelenen tesislerdeki ağır metal seviyelerinin ülkelere göre hatta aynı ülke içerisinde şehir bazında farklılıklara sahip olduğu görülmektedir ve bu durumda bölgesel verilerin elde edilmesi önem kazanmaktadır. Dolayısıyla etkili bir atıksu arıtımı ve üretilen çamurun yönetimini gerçekleştirmek için atıksu arıtma tesislerindeki ağır metal davranışlarının incelenmesi önemli olmaktadır. Bu nedenlerle önerilen bu çalışmanın amacı, Antalya ilinin en büyük kentsel atıksu arıtma tesisi olan Hurma Atıksu Arıtma Tesisindeki katı ve sıvı fazdaki ağır metal içeriklerinin takibini yaparak ağır metallerin davranışlarının ve mevcut arıtım proseslerinin ağır metal giderim performanslarını inceleyerek değerlendirmektir. Ayrıca ilgili tesiste çeşitli aşamalarda yapılacak ağır metallerin izleme çalışmaları ile elde edilen sonuçlarla hem literatüre katkı sağlanacağı hem de tesisteki tipik evsel atıksu arıtma prosesleri için etkin atıksu arıtımı ve üretilen çamurun verimli yönetimine ışık tutacak verilerin elde edileceği düşünülmektedir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Ağır Metaller

Ağır metaller, özgül ağırlıkları 5 gr/cm^3 ' den daha yüksek olan periyodik cetvelin geçiş elementleri olarak tanımlanan geniş bir gruba aittirler (Okcu vd., 2009). Bu gruba kurşun, kadmiyum, krom, demir, gümüş, bakır, nikel, civa ve çinko olmak üzere 60' tan fazla metal dâhildir. Bu elementler, doğaları gereği yer kürede genellikle karbonat, oksit, silikat ve sülfür halinde kararlı bileşikler olarak bulundukları gibi aynı zamanda silikat içerisine hapsedilmiş olarak da bulunurlar (S. Çay, 2014).

2.1.1. Ağır metallerin kullanım alanları ve çevreye yayılımı

Hem canlılar hem de çevre için tehdit yaratan kirleticilerden biri olan ağır metaller, teknolojinin de gelişmesiyle birlikte günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. Bunların en başında endüstriyel faaliyetler gelmektedir. Bu sebeple ağır metallerin çevreye yayılmasında, doğal çevrimlerden daha çok insan kaynaklı faaliyetler etkilidir. Çevreye yayılımda etken olan doğal çevrimlerin en başında minerallerin hava ve rüzgâr etkisiyle aşınması, erozyon ve volkanik patlamalar gelirken endüstriyel faaliyetlerde ise çimento üretimi, demir çelik sanayi, termik santraller, cam üretimi, çöp ve atık çamur yakma gibi tesisler gelir (S. Çay, 2014; Yücel, 2010). Çizelge 2.1'de temel endüstrilerden çevreye atılan ağır metal türleri gösterilmiştir.

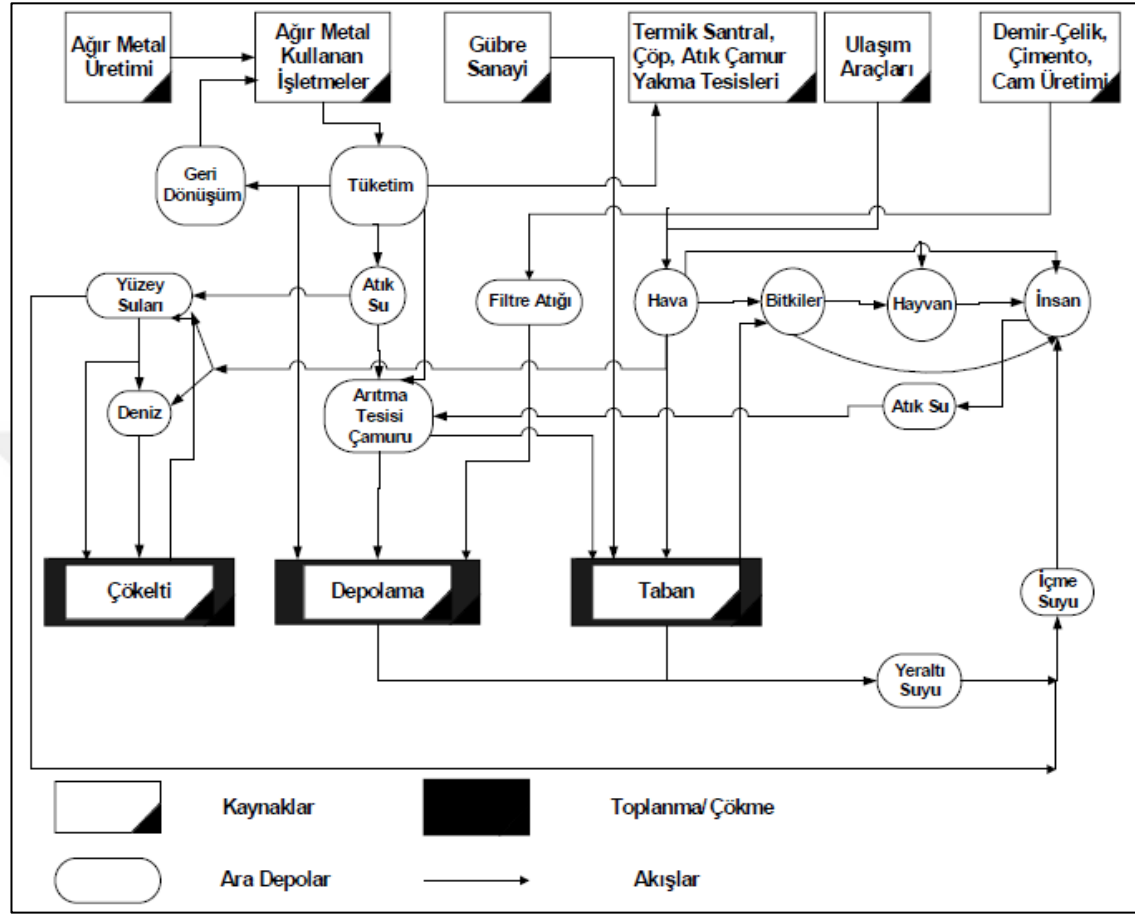
Çizelge 2.1. Temel endüstrilerden atılan ağır metal türleri (S. Çay, 2014)

Endüstri Tipi	Co	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Sn	Zn	Fe	As	Al	Mn	Mo	V
Kâğıt	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrokimya	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+
Klor-Alkali	-	+	+	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-
Gübre Sanayi	-	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
Demir-Çelik	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Enerji Üretimi	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+

Bu temel endüstrilerin dışında haberleşme, ambalaj, otomotiv, harp sanayisi gibi birçok alanda ağır metaller kullanılmaktadır. Hatta kullandığımız bazı kozmetik, saç bakım ürünlerinde de ağır metallerin kullanımı mevcuttur.

Ağır metaller, su kaynaklarına, endüstriyel atıklarla ya da asit yağmurlarının topraktaki ağır metalleri çözmesi ile ırmak, göl ve yeraltı sularına taşınmasıyla geçer. Sulara taşınan bu ağır metaller seyreterek kısmen karbonat, sülfat, sülfür şeklinde katı bileşikler oluştururlar. Daha sonra su tabanına çökerek bu bölgede zenginleşir ve sediment tabakasının da sınırlı bir adsorpsiyon kapasitesi olduğu için suların ağır metal konsantrasyonları giderek artar. Ayrıca havaya karışan ağır metaller de yağışla toprağa ve oradan da bitkilere ve besin zinciriyle de diğer canlılara ulaşır ve solunum yoluyla da

havadaki aerosol ve toz halindeki ağır metaller insan ve hayvanlara geçerler (S. Çay, 2014; Yücel, 2010). Şekil 2.1’de farklı sektörlerden ağır metallerin doğaya yayılımı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Şematik olarak ağır metallerin doğaya yayılımları (Yalçın, 2012)

2.1.2. Ağır metallerin canlılara ve çevreye olan etkileri

Bazı ağır metaller, canlıların yaşamsal faaliyetlerini gerçekleştirebilmesi için gerekliyken bazıları ise toksik olabilir. Bu yaşamsal olan ağır metallerin, canlıların bünyesinde belli bir konsantrasyonlarda olması ve dışardan belli oranda besinlerle alınması gerekebilir. Buna karşın toksik etki gösteren ağır metallerse çok düşük konsantrasyonlarda bile ciddi yaşamsal problemlere sebep olabilir. Bu toksisite kavramı, metal konsantrasyonuna bağlı olduğu gibi organizma türüne ve de metal iyonunun yapısına (çözünürlüğü, kimyasal yapısı, redoks ve kompleks oluşturma yeteneği, vücuda alınış şekli, çevrede bulunma sıklığı vb.) da bağlıdır. Örneğin, nikel hayvanlarda iz elementi olarak bulunması gerekirken bitkiler için toksik etki gösterir (Kahvecioğlu vd., 2003; Yücel, 2010). Çizelge 2.2’de ağır metallerin ekolojik sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 2.2. Önemli ağır metallerin ekolojik sınıflaması (Okcu vd., 2009)

Element	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Bitki ve hayvan için gereklilik	Kirletici olup olmadığı
Ag	10.5	-	K
Cd	8.5	-	K
Cr	7.2	G	K
Co	8.9	G	K
Cu	8.9	G	K
Fe	7.9	G	K
Hg	13.6	-	K
Mn	7.4	G	-
Pb	11.3	-	K
Mo	10.2	G	K
Ni	8.9	G	K
Pt	21.5	-	-
Tl	11.9	-	K
Sn	7.3	-	K
U	19.1	G	K
V	6.1	G	K
W	19.3	G	K
Zn	7.1	G	K
Zr	6.5	-	-

Ağır metaller biyolojik olarak parçalanamadıklarından dolayı ekosistemde ve canlılarda birikime sebep olurlar ve bu birikimin etkileri hemen görülmeyebilir. Bu sebeple ağır metal birikimini yakından takip etmek için birçok endüstrileşmiş ülkelerde farklı izleme programları kullanılmaktadır. Son yıllarda maliyeti daha düşük olan ve geniş alanlarda ağır metal kirliliği hakkında bilgi veren biyomonitör canlılar kullanılarak da araştırmalar yapılmaktadır (S. Çay, 2014; Yücel, 2010).

2013/39/EU sayılı direktifte, Çevresel Kalite Standartlarını (ÇKS) karşılamak ve dolayısıyla yakın gelecekteki tüm yüzeysel su ve yeraltı suları için iyi bir duruma ulaşmak için çevreye verilen emisyonları (öncelikli tehlikeli maddeler) ortadan kaldırmak veya azaltmak zorunda olunan 45 öncelikli kirletici listelenmiştir. Cd, Hg, Ni ve Pb öncelikli kirleticiler arasında yer almaktadır. Bunlardan ilk ikisi (Cd ve Hg) ayrıca tehlikeli olarak sınıflandırılmaktadır. As, Cu, Cr ve Zn gibi diğer metaller de gelecekte potansiyel olarak öncelikli maddeler haline gelebilecek ek maddeler listesinde yer almaktadır. Ülkemizde de dünyadaki gelişmelere paralel olarak yasal mevzuattaki eksiklikler, SKKY ve bu konuyla ilgili tebliğ ve diğer yönetmeliklerle giderilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca ABD Temiz Su Yasası'nın ve AB Su Çerçeve Direktifinin Türkiye'de uygulanabilirliği üzerine çalışmalar da devam etmektedir.

2.1.2.1. Kurşun

Kurşun, atom numarası 82 olan ve parlak mavi- gri renkte bir metaldir (Önder, 2012). Yaklaşık 5000 yıl öncesinde Antik Yunanlılar tarafından gümüş üretim aşamasında yan ürün olarak keşfedilmiştir ve her geçen gün kullanımı artmıştır (Kahvecioğlu vd., 2003). Toksik olan bu metal, atmosfere hem metal hem de bileşik olarak yayılabildiğinden dolayı çevresel kirlilik yaratan en önemli ağır metaldir (Okcu vd., 2009).

Kurşun bileşikleri motorlarda patlama önleyici amaçlı 1920’lerde benzine ilave edilmeye başlanmıştır. Kurşunun çevreye yayınımlında büyük etkisi olan bu durumun daha az kurşun içeren kurşunsuz benzin üretimiyle önüne geçilmeye çalışılsa da hala çevreye yayınımlı devam etmektedir. Ayrıca kurşunun levha, tel ve kablo imalatı, yapı kaplamaları, pestisit, akü, su borularının alaşımları seramik sırlar, şarj edilebilir piller, kozmetik gibi birçok kullanım alanı mevcuttur (Kahvecioğlu vd., 2003; Önder, 2012). Bu durum çevre ve besin kirlenmesine sebep olur, örneğin; benzindeki kurşun bileşikler, egzoz gazları ile yakın olan su, toprak, hava ve bitkilerde yüksek konsantrasyonlarda birikir.

İnsan vücudundaki kurşun miktarı yaklaşık 125-200 mg civarındadır ve normal koşullarda bir insan günde yaklaşık 1-2 mg kadar kurşunu atabilmektedir. Su, hava ve besinlerle alınan kurşun miktarı arttıkça vücutta birikime sebep olur ve bunun yaklaşık %95’i kemiklerde ve yumuşak dokularda depolanır. Kemiklerdeki kurşunda zamanla çözünerek böbreklere geçtiği için en fazla böbreklerde birikerek böbrek tahribatına neden olur. Eski iskeletler üzerinde yapılan sonuçlarla şimdiki kemik analizleri sonuçları karşılaştırıldığında günümüzdeki sonuçlarda 500-1000 kat kadar fazla kurşun bulunduğu ortaya çıkmıştır (Dinç, 2012; Kahvecioğlu vd., 2003). Ayrıca kurşun, yaşam boyunca vücutta birikebilen bir metal olduğu için düşük dozlarda bile zehirlenmeye sebep olabilir. Kurşun zehirlenmesinde, eklemlerde ağrı, yorgunluk, titreme, baş ağrısı, diş etlerinde mor çizgiler, kusma gibi etkiler gözlenmektedir (Önder, 2012). Önlem alınmayan kurşun zehirlenmelerinde ise körlük, felçler, hafıza kayıpları, kısırlık, karaciğer ve böbrek yetmezliği gibi rahatsızlıklar gerçekleşebileceği gibi koma ve ölümlerle de sonuçlanabilir. Ayrıca kurşun, anneden hamilelik ve emzirme dönemlerinde bebeğe geçerek bebekte sinir sistemi bozuklukları ve gelişme geriliklerine de sebep olabilir (S. Çay, 2014; Y. Dünder ve Aslan, 2005).

2.1.2.2. Civa

Civa, atom numarası 80 olan gümüş-beyaz renkli bir metaldir (Önder, 2012). Besin ve çevre kirliliğine sebep olan en önemli metaller arasındadır (Dinç, 2012). Civa, elektrik ve kontrol aletleri sanayi, laboratuvar ürünleri, kâğıt sanayi, diş hekimliği (amalgam dolgular), madencilik, çimento ve kireç sanayi, plastik sanayi gibi birçok endüstriyel faaliyetlerde ve tarımda pestisitlerde kullanılmaktadır. Bu metalin çevreye yayılımında bu endüstriyel faaliyetler ve pestisitlerinin yanı sıra kanalizasyon çamurları, fosil yakıtlar, ahşap ve atıkların yanması da yer almaktadır (Dinç, 2012; Önder, 2012). Çünkü civanın bütün bileşikler zararlı olduğu gibi buharları da zehirlidir ve oda sıcaklığında bile buharlaşabilmektedir. Ayrıca insan vücuduna solunum ve deri yoluyla alınan civa, sindirim yoluyla alınan civadan çok daha fazladır. Topraktaki civanın da önemli bir kısmı atmosferdeki civadan kaynaklanmaktadır ve bu metalin organik

maddelere karşı affiniyeti (birleşme eğilimi) yüksektir. Bu sebeple asidik karakterdeki organik topraklara sıkı bir şekilde bağlandığı için yağışlarla da kolay kolay yıkanamaz (Okcu vd., 2009). Çeşitli yollarla toprağa ve suya karışan civa, anaerobik ve aerobik şartlar altında bakteriler ve kimyasal reaksiyonlarla daha toksik etkisi olan metil civaya dönüşür ve bu maddelerde planktonlar tarafından absorbe edilir. Daha sonra bu metil civa planktonlardan küçük balıklara, küçük balıklardan büyük balıklara geçerek besin zincirine karışır (M. Öztürk, 2006; Ş. Şener, 2010). İnsanlar, civaya en çok deniz ürünlerinden, amalgamdan ve sigara dumanından dolayı maruz kalmaktadır ve bu durum minamata hastalığı olarak bilinen bir tür civa zehirlenmesine sebep olabilir (Dinç, 2012; Önder, 2012). Minamata hastalığının tipik belirtileri ise ellerde ve ayaklarda uyuşukluk, genel kas güçsüzlüğü, periferik görme kaybı ve göz hareketlerinde düzensizlik, işitme ve konuşma bozukluklarıdır. Daha ağır durumlarda belirtiler başladıktan birkaç hafta sonra şizofreni, felç koma ve ölüm gibi sonuçlar oluşabilir (Anonim 1).

Civa, bitkilerde büyüme gecikmesi, erken yaşlanma, yapraklarda protein sentezini inhibe etmesi, fotosentetik aktiviteyi azaltması gibi etkiler göstermektedir. Kuşlar ve memelilerdeki civa zehirlenmesi kendisini, bacak ve kanatlarda güçsüzlük, kas hareketlerinde koordine sorunları, düzensiz hareketler gibi nörolojik hastalıklarla göstermektedir. İnsanlarda en çok merkezi sinir sistemi zarar görmektedir fakat uzun süre maruz kalınması durumlarında böbreklerde de hasarlar meydana getirebilmektedir (Önder, 2012). Ayrıca, anneden bebeğe plasenta ile geçebildiği için bebekte tedavi mümkün olmayan nörolojik rahatsızlıklara neden olabilir (M. Öztürk, 2006).

2.1.2.3. Kadmiyum

Atom numarası 48, gümüş-beyaz renkli, parlak metal görünümlü bir metaldir. Kadmiyum doğada saf olarak bulunmayan, çinko üretimi sırasında yan ürün olarak üretilen bir elementtir. Çok fazla kullanım alanına sahip olan bu elementin çevreye yayılımı da gün geçtikçe artmaktadır (Önder, 2012). Suda çözünme özelliği en yüksek metal olduğu için doğada yayılımının hızlı olması, yarılanma ömrünün uzun olması ve çok düşük dozlarda bile toksik etki göstermesi nedeniyle çevre kirliliğine sebep olan önemli elementlerden birisidir (Kahvecioğlu vd., 2003; Okcu vd., 2009). Kadmiyum; pillerde, gemi sanayisinde, boya sanayisinde kullanılması yanı sıra fosfatlı gübrelerde, deterjanlarda da kullanılmaktadır (Okcu vd., 2009; Önder, 2012). Ayrıca kadmiyum insan yaşamının da içinde çokça rastlanmaktadır. Mesela sigara dumanında, rafine edilmiş yiyecek maddelerinde, çokça tükettiğimiz çay ve kahvede, mantarlarda, kabuklu deniz ürünlerinde, su borularında, kömür dumanında bulunmaktadır (Kahvecioğlu vd., 2003).

Kadmiyum, insanlarda nefes yoluyla alındığında akciğer hastalıklarına neden olurken ağız yoluyla yani su ve gıdalarla alındığında ise özellikle böbrek ve karaciğerde birikerek ileriki yaşlarda böbrek ve karaciğer yetmezliği, kemiklerde hassasiyet, demir eksikliği gibi birçok rahatsızlığa yol açar ve pek çoğu ölümle sonuçlanabilir (Dinç, 2012). Bitkilerde yapılan araştırmalara göre yüksek kadmiyum kök, gövde ve yaprak büyümesini inhibe ettiği rapor edilmiştir (Yücel, 2010). Sucul organizmalarda larvaların büyüme ve yaşama oranlarını düşürmektedir (Kahvecioğlu vd., 2003). Kadmiyum insan vücudundan yaklaşık olarak günlük 40 µg kadar atılabilir (Kahvecioğlu vd., 2003).

2.1.2.4. Nikel

Atom numarası 28 olan Nikel (Ni), periyodik tabloda demir-kobalt grubunda (Grup VIII) yer alan gümüş- beyaz renkte, sert şekillendirilen ferromanyetik bir metaldir (Önder, 2012). Demir, bakır, krom ve çinko gibi bazı önemli metallerle alaşım oluşturarak kullanılmaktadır (Dinç, 2012). Madeni para, mücevher, cerrahi implantlarda, mutfak araç gereçlerinde, jet motoru parçaları ve zırh kaplama gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak en büyük kullanım alanı paslanmaz çelik üretimidir. Nikelin çevreye yayılımında en çok madencilik ve ergitme, fuel oil ve kömür yanması ve kanalizasyon çamurları etkilidir (Dinç, 2012; Önder, 2012).

Bitkilerde köklerinin büyümesinin engellenmesine ve tahribine, yapraklarda klorozis oluşumuna, balıklarda da uzun süre düşük seviyede nikel maruz kalındığında iskeletlerde kireçlenmeye ve boğulmaya neden olmaktadır (Dinç, 2012; Yücel, 2010). İnsanlar ise en fazla gıda, hava ve sigara ile nikel maruz kalırlar (Dinç, 2012). Solunum yoluyla vücuda giren nikel bileşikleri, pnömonisi ile kortikal yetmezliğe, solunum borusu tahribatı, immünolojik değişim, pulmoner ödem ve karaciğer dejenerasyonu, silia aktivitesi ve immünite baskısında azalma gibi anormal fonksiyonlar, solunum yolu kanseri ve astıma yol açabilmektedir (Önder, 2012; Yücel, 2010). En yaygın görünen toksikolojik etkisi ise dermatolojik alerjik reaksiyonlardır. Cilt teması halinde deri dökülmesi şeklinde kendini gösterir (Önder, 2012; Ş. Şener, 2010; Yücel, 2010). Nikel ve bileşiklerinin kanserojen potansiyeli son yıllarda endişe yaratmaktadır (Önder, 2012).

2.1.2.5. Bakır

Bakır (Cu), IB grubunda, atom numarası 29 olan ve ısı ve elektriği iyi ileten biçimlendirilebilir bir metaldir. Sektörel kullanım açısından geniş bir yelpazeye sahiptir ve en yaygın kullanım alanı tel üretimi için elektrik endüstrisidir. Mutfak araç-gereçleri, tel ve pirinçten yapılmış eşyalar, vernikleme, telefon ve elektrik kabloları, su dağıtım sistemleri, gübre, kümes hayvanları üretiminde ajan olarak, bakteri ve mantar ilaçları gibi kullanım alanları mevcuttur (Önder, 2012; Ş. Şener, 2010). Özellikle bakır ve bileşenlerinin, küçük ve basit yapıları canlılar için zehirleyici özellikte olması nedeniyle pestisit olarak tarım zararlılarına ve yumuşakçalara karşı yaygın olarak kullanılmaktadır (Ş. Şener, 2010).

Bakır, canlı organizmalarda doğal olarak bulunan ve eser miktarda da olsa bulunması gereken bir element olmasına rağmen diğer toksik metaller gibi yüksek konsantrasyonları toksisiteye neden olmaktadır (Yalçın, 2012). İnsanlarda Cu eksikliği anemi, kalp-damar hastalıkları, saç azalması, zihinsel ve sinir sistemi bozukları gibi etkileri olurken yüksek miktarda maruz kalma durumunda eklem ve kas ağrıları, depresyon, sinirlilik durumu, hafıza zayıflaması, böbrek ve karaciğer rahatsızlıklarına ve hatta sonucunda ölümlere bile yol açmaktadır (Önder, 2012; Yalçın, 2012; Yücel, 2010).

Bakırın çevreye yayılımının ana kaynakları; araba mezarlıkları, bakır içeren pestisitler, fren balataları, su dağıtım boruları, soğutma suyu deşarjları, metal kaplama ve işleme endüstrileri, maden eritme işlemleri ve çatı malzemeleridir. Ayrıca pestisitlere maruz kalan bitkilerle beslenen hayvanların dışkıları da toprakta Cu birikimine yol açabilir (Dinç, 2012). Öte yandan pestisitte yer alan bakır iyonları insan sağlığı açısından

vücudun bakır dengesini bozduğu, karaciğer, beyin ve böbreklerin normal çalışmasını bozduğu ve enzim aktivitelerini engellediği için tehlikelidir (Ş. Şener, 2010).

2.1.2.6. Çinko

Periyodik cetvelde II-B grubunda, atom numarası 30, mavimsi açık gri renkli olan bir elementtir (Önder, 2012; Ş. Şener, 2010). Zn ve bileşikleri diğer ağır metallere göre daha düşük toksik etki gösterir (Ş. Şener, 2010; Yücel, 2010). Ancak demir, alüminyum ve bakırdan sonra dünya da yıllık tüketim miktarı en fazla olan elementtir (Önder, 2012). Bu sebeple bu geniş çaplı endüstri alanlarında kullanılmasının etkisiyle çevrede yayılımları her geçen gün artmakta ve toksik düzeylere ulaşmaktadır (Dinç, 2012). Korozyon önleme, plastik, çelik sanayi, boya maddeleri, otomobil endüstrisi, mürekkep, silgi, kozmetik, elektrik ekipmanları gibi çok çeşitli alanda kullanılmaktadır. En yaygın kullanım alanı ise metal kaplama ve alaşım sektörüdür. Ayrıca tarımda mikrobesein gübresi ve insektisit olarak da kullanılmaktadır (Dinç, 2012; Önder, 2012). Zn, endüstriyel atıksular, kanalizasyon suları ve asit yağmurlarının Zn üzerindeki aşındırıcı etkisi ile ve arıtma çamurları, katı atıklar ile çevredeki konsantrasyonu artmaktadır. Topraktaki yüksek Zn konsantrasyonu Zn zehirlenmesine yol açmaktadır. Hayvanlarda Zn toksisitesi hayvanın cinsine bağlı olarak farklılık gösterebilir ve genel olarak hayvanlarda iştahsızlık, kansızlık, gelişmede gerileme ve pankreasta düzensizlik gibi rahatsızlıklar ortaya çıkabilir (Dinç, 2012; Önder, 2012). İnsanlarda akut zehirlenme belirtileri karın ağrısı, ishal, mide bulantısı şeklinde kendini gösterir. Ayrıca denge problemi, yorgunluk, kaygı, depresyon, sinirlilik, uykusuzluk, saç dökülmesi, hafıza kaybı, görme bozuklukları, ülser, akciğer ve böbrek rahatsızlıkları ve beyin hasarları gibi rahatsızlıklara neden olmaktadır (S. Çay, 2014; Yücel, 2010). Bunların yanı sıra çinko canlıların yaşamı için yani gelişim, yumurta oluşumu, bağışıklık, yaraların iyileşmesi, karbonhidrat, yağ, protein, nükleik asit gibi çeşitli metabolik faaliyetlerin gerçekleşmesi için gerekli olan bir elementtir (Yücel, 2010).

2.1.2.7. Krom

Krom (Cr), atom numarası 24 olan ve periyodik tablonun VIB grubunda yer alan bir elementtir. Hayvan, bitki, toprak, kaya, volkanik toz ve gazlarda doğal olarak bulunur. Çevrede birkaç formu bulunur ve en yaygın bulunan formları Cr(0), Cr(III) ve Cr(VI)'dır. Kromun; çelik üretimi, metal endüstrisi, deri endüstrisi, gıda koruyucu, kâğıt endüstrisi, krom kapmalar, boya, tuğla, gübreler, kimya sanayi ve enerji santralleri gibi çok geniş uygulama alanları mevcuttur (Dinç, 2012; Önder, 2012).

Cr, insan ve hayvan beslenmesi için gerekli bir elementtir. En fazla krom; et, bakliyat, hububat ve baharatlarda bulunmaktadır. Süt ürünleri, birçok meyve ve sebzede ise az miktarda krom vardır (Kahvecioğlu vd., 2003). Krom eksikliğinde insanlarda, bozulmuş glukoz toleransı, glikozüri ve serum içinde insülin, kolesterol ve toplam trigliseridin yükselmesi görülebilir. Hayvanlarda ise aortik plak ve boyut bozuklukları, korneal lezyon oluşumu, büyüme bozukluğu, değişmiş immün fonksiyonu gibi semptomlar ve üreme fonksiyonlarında azalma görülebilir (Önder, 2012).

Kromun farklı formları organizmalarda farklı toksik etki yapar. Altı değerlikli krom, üç değerlikli kromdan daha toksiktir ve her ikisi de potansiyel kanserojendir (Dinç, 2012; Kahvecioğlu vd., 2003; Önder, 2012). Özellikle solunum organlarına etkileri daha

fazladır. Cr^{+6} solunum yoluyla burun akmaları, burun kanamaları, kaşınma, vücuda girmesi sonucu karaciğer ve gırtlak iltihaplarına, zatürre, bronşit ve üst solunum yollarında delinmeler ve hatta ölümlere bile yol açabilir. Cr^{+3} solunum yollarında Cr^{+6} kadar olumsuz etki yapmamaktadır (Dinç, 2012; Kahvecioğlu vd., 2003). Bunun yanı sıra Cr, Ni den sonra ikinci deri alerjenidir ve temas halinde deri hastalıklarına neden olabilmektedir (Önder, 2012; Yücel, 2010).

2.1.2.8. Arsenik

Arsenik(As)'in atom numarası 33 ve periyodik cetvelde VA grubunda yer alan gümüş gri renkli bir elementtir. Boya, pestisit, cam, seramik ve lastik imalatı, deri ve kâğıt endüstrisi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Doğal dengeyi bozan kirleticiler arasında yer alır ve neredeyse tüm bileşikleri toksiktir. İnsan vücuduna daha çok solunum, sindirim alınsa da deri yoluyla da alınmaktadır. Solunum yoluyla alınan arseniğin kanserojen olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca, böbrek yetmezliğine, zihinsel problemlere, deri ve akciğer kanserine sebep olabilir (Dinç, 2012; Yücel, 2010).

2.2. Atıksu Arıtma Tesisleri ve Ağır Metaller

Atıksu, evsel, tarımsal, endüstriyel ve diğer kullanımlar sonucu kirlenmiş veya özelliği değişmiş, içinde sağlığa ve çevreye zararlı biyolojik ve kimyasal maddeleri içeren suları ifade eder. Bu sular akarsu, deniz, yeraltı suları ve göllerdeki çevre kirliliğinin en önemli kaynağıdır. Arıtılmadan alıcı ortama verilen atıksular, ötrifikasyona, balık ölümlerine, yüzey sularında anaerobik ortama ve koku oluşumlarına sebep olur. Bu durum içme suyu kalitesini de etkileyip kolera, sarılık, tifo gibi hastalıkların yayılmasına neden olmasının yanı sıra tarım ve endüstriyel alanda da kullanımlarını kısıtlar veya engeller. Bu sebeple alıcı ortama verilmeden önce alıcı ortam deşarj standartlarına göre arıtımı gerçekleştirilmelidir (M. Ş. Dündar vd., 2012).

Atıksuların arıtılma sebepleri;

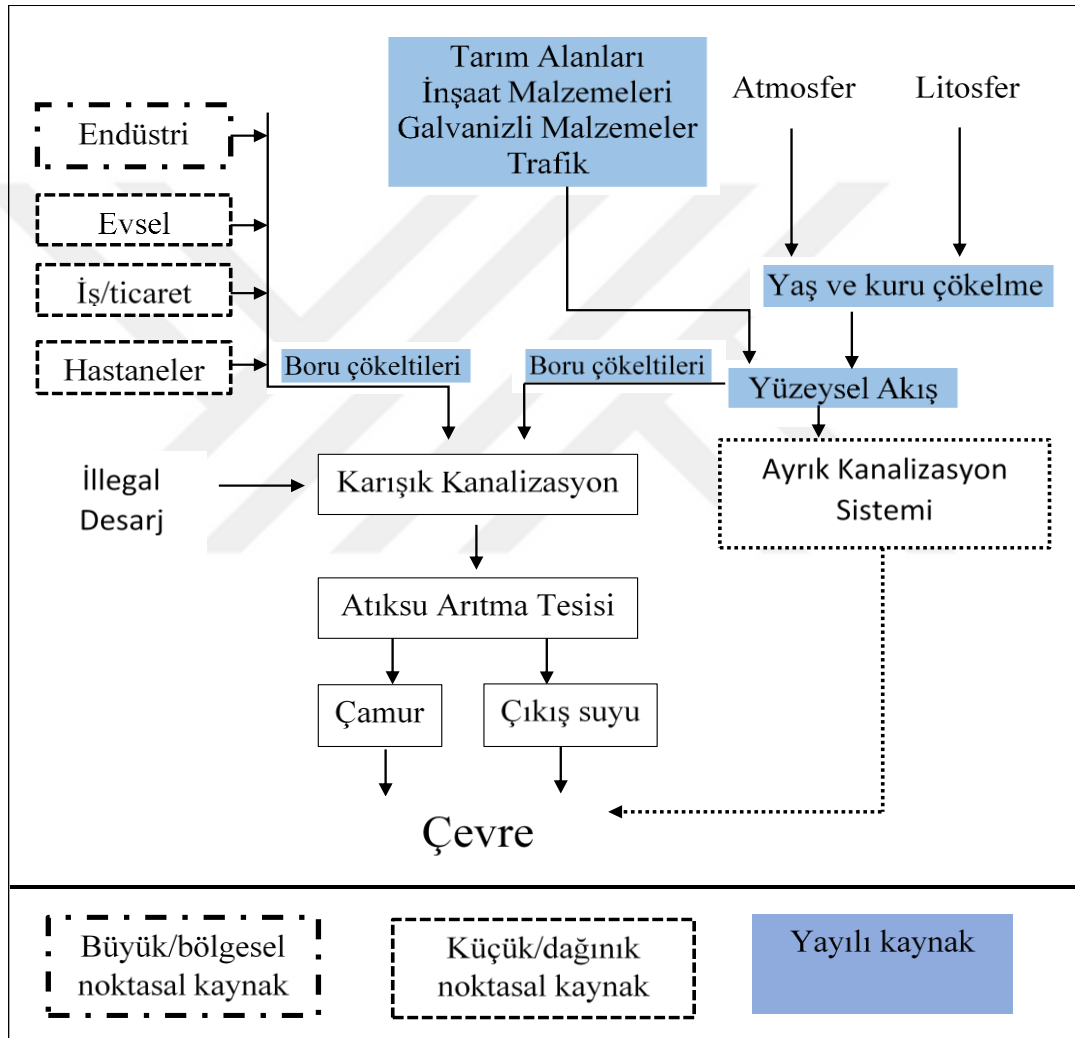
- Tarımsal ve sucul alanlarını koruma
- Hastalık oluşumunu önleme
- Kötü koku ve görünümü engelleme
- İçme ve kullanma suyu kaynaklarında kirliliği önleme
- Rekreatiyonel su kaynaklarında kirliliği önleme
- Sucul yaşamı korumak
- Su kanallarındaki kirliliği ve çökeltilerle dolmasını önlemektir (Şama, 2017).

2.2.1. Atıksu arıtma tesisine gelen ağır metal kaynakları

Ağır metallerin atıksu içinde birikimi, bölgedeki sanayi türleri, insanların yaşam tarzı ve atıkların dikkatsiz çöpe atılmasının sonucu gibi bir dizi yerel faktöre bağlıdır (Oliveira vd., 2007). Dolayısıyla kentsel atıksudaki metaller esas olarak konutlardan, endüstriyel faaliyetlerden ve yağmursuyu akışından kaynaklanmaktadır (Üstün, 2009). Tekstil ve motor yağı sanayileri, metal kaplama tesisleri, madencilik işlemleri, gübre ve zirai ilaç endüstrileri, tabakhaneler, pil ve akümülatör üretim prosesleri gibi çeşitli endüstri üretimleri sonucu ortaya çıkan atıksularda pek çok ağır metal bulunmaktadır

(Chipasa, 2003). Ayrıca hastanelerden gelen atıksularda da dezenfektanlar, teşhis ajanları ve ilaçlardan kaynaklı olarak ağır metaller bulunur. Ağır metallerin birçok alanda kullanılmasından dolayı evsel atıksularda da bulunmaktadır. Mesela, dışkı ve idrar, deterjanlar, gıda ürünleri, kozmetik ürünler, boyalar ve paslanmış borulardan gelen sular bunlara örnek olarak verilebilir. Bunların yanı sıra kentsel yüzeysel akış ile çatılardan, araba yıkama, trafik, tarım alanlarından da ağır metaller kanalizasyona karışmaktadır (Cantinho vd., 2016; Chipasa, 2003).

Şekil 2.2’de Atıksu Arıtma Tesislerine (AAT) giren metallerin kaynakları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Atıksu arıtma tesislerine giren metallerin kaynakları (Cantinho vd., 2016)

Ağır metallerin atıksudaki varlığı çevre için endişe kaynağı olduğu gibi aynı zamanda mikrobiyal aktiviteyi olumsuz yönde etkilediği için biyolojik atıksu arıtma prosesleri için de sorun oluşturabilmektedir (Üstün, 2009). Örneğin ağır metallerin nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemlerini inhibe ettiği rapor edilmiştir (Chipasa, 2003). Bu nedenlerle esasen özellikle kanalizasyona bağlanan endüstriyel atıksu girişleri de düşünüldüğünde geleneksel evsel AAT’leri ağır metal giderimi için uygun değildir

(Üstün, 2009). Çizelge 2.3’de literatürdeki AAT’lerine farklı kaynaklardan gelen ağır metallerin emisyon incelemeleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Kentsel atıksu sistemlerine farklı kaynaklardan gelen metallerin karşılaştırılması (AAT’ye gelen toplam yükün %’si) (Cantinho vd., 2016)

	Kaynaklar	Cd (%)	Cr (%)	Cu (%)	Hg (%)	Ni (%)	Pb (%)	Zn (%)
AB ülkeleri ^a (EC, 2001)	Evsel	20-40	2-20	30-75	4 ^b	10-50	26-80	28-50
	İş / ticari	29-61	35-60	3-21	58 ^b	27-34	2-24	5-35
	Kentsel akış/yağmur suyu	3-41	2-22	4-6	1 ^b	9-16	29-33	10-16
İsveç, Stockholm Henriksdal AAT (Sörme ve Lagerkvist, 2002)	Kanalizasyon suyu	55	17	91	66-69	39	40	61
	Evsel	20	2	59	44-47	16	1	30
	Drenaj suyu	3	2	2	1	10	1	4
	Boru çöktürmeleri ^c	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
	İş / ticari	32	13	30	21	13	38	27
	Kentsel akış / yağmur suyu	5	1	18-22	(-)	1	13-15	36-37
	Binalar ^c	1	(-)	13-17	(-)	(-)	(-)	24
	Trafik ^c	1	<1	5	(-)	<1	9-11	10-11
	Atmosferik birikim ^c	4	1	<1	(-)	1	4	2
	Boru çöktürmeleri ^c	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
İsveç, Göteborg Rya AAT (Mattsson vd., 2012)	Evsel 1988	25	21	29	40	23	15	8
	Evsel 2006/07	35	34	54	43	32	41	54

^aÜç ülke için değer aralıkları, Fransa, Norveç ve İngiltere (ADEM 1995, SFT raporu 97/98 ve WRc, 1994, EC 2001a tarafından belirtilmiştir)

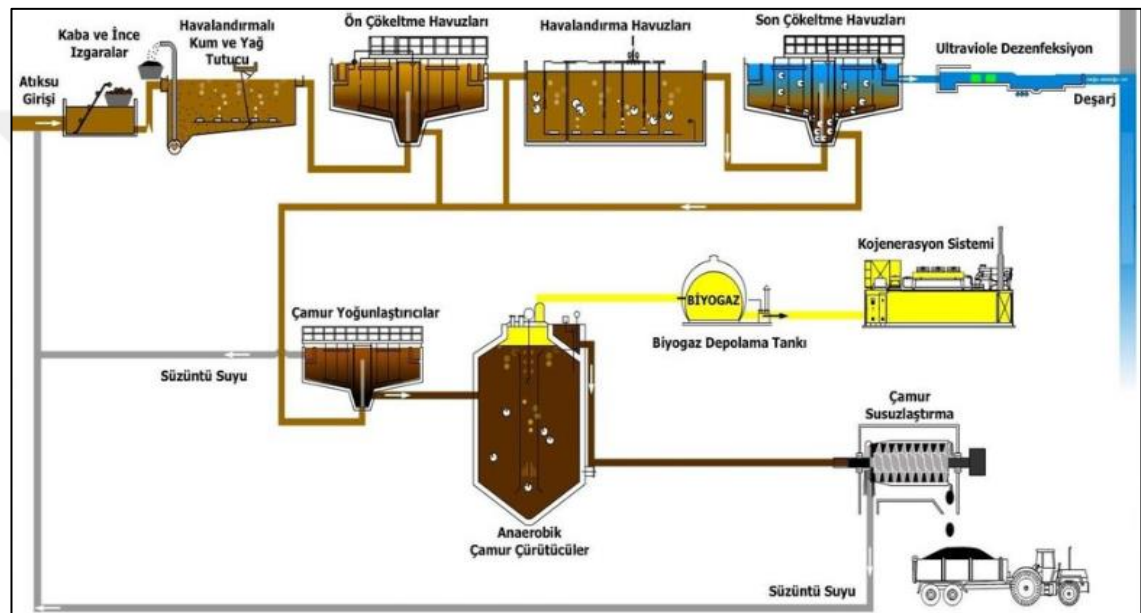
^bYalnızca Fransa’ya ilişkin veriler (EC 2001a’da belirtilen ADEM 1995)^c(-) Kaynağın, çalışmadaki diğer kaynaklarla karşılaştırıldığında önemsiz olduğunu gösterir; (+) kaynağın büyük olasılıkla önemli olduğunu, ancak miktarın tahmin edilmediğini gösterir.

^dRya AAT tarafından hizmet verilen iki yerleşim biriminin verileri (700 kişi müstakil evler; 2400 kişi, apartman daireleri)

Arıtma tesise gelen atıksuyun ağır metal konsantrasyonları, farklı kaynaklardan gelmesinden dolayı farklılık gösterebilir (Carletti vd., 2008). Çizelge 3.1.’e baktığımızda EC (2001)’in yapmış olduğu çalışmada evselde en yüksek Cu, Pb iken iş yerlerinden gelen atıksuda Cd, Cr, Hg en yüksek konsantrasyonlarda görülmüştür. Sörme ve Lagerkvist (2002), Stockholm’deki Henriksdal AAT’de atıksu ve yağmur suyu içerisindeki metal kaynaklarını araştırmış ve Cu, Zn, Ni ve Hg (sırasıyla %110, 100, 70 ve 70’ i bulunmuştur) kaynaklarını izlemenin mümkün olduğu sonucuna varmıştır. Bu metaller için en büyük kaynaklar, Cu için musluk suyu ve çatılar, Zn için galvanizli malzemeler ve otomobil yıkamaları, Ni için içme suyu ve AAT’de kullanılan kimyasallar ve Hg için dişlerde amalgam olarak tanımlanmıştır. Kaynakların daha az anlaşıldığı Cd, Pb ve Cr için (sırasıyla %60, 50 ve 20’ si bulunmuştur) en büyük katkının otomobil yıkamaları olduğunu belirtmiştir. Mattsson vd. (2012), İsveç’teki Göteborg bölgesindeki Rya AAT’ye metallerin katkısının 1988’ e göre 2006/07 yılları arasındaki çalışmada arttığı gözlenmektedir. Bu çalışmada hanelerden gelen yükün %10-25 arttığı ve Cd’nin kaynağının sanatçı boyalarından ve Hg’nin kaynağı olarak da diş hekimleri ve hastanelere bağlanan lağım borularındaki çöktürmelerin olduğunu vurgulamıştır.

2.2.2. Atıksu arıtma tesisi giderim aşamaları

İnsan faaliyetleri sonucu kalitesi bozulmuş her türlü suya atıksu denir. 19. yüzyılın ortalarında İngiltere’de su yoluyla ortaya çıkan birtakım hastalıkların, özellikle de koleranın, yayılması sonucu atıksuların arıtılması gerektiği ortaya çıkmış ve 20. Yüzyılın başlarında bu yöndeki faaliyetler başlamıştır. Günümüzde, yasal düzenlemelerin sıkılaşmasıyla, özellikle de şehirlerde, atıksuyun arıtılabilmesi için kaynağından toplanarak arıtma tesislerinde işleme tabi tutulmaktadır (C. Öztürk, 2007). Atıksu arıtımı, atıksuda bulunan kirleticilerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerle uzaklaştırılarak belirli standartlara uygun şekilde çıkış suyu (arıtılmış su) ve katı atık (çamur) şeklinde son bulması işlemidir. Tipik bir evsel AAT’deki akım şeması Şekil 2.3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Atıksu arıtma tesisi akım şeması (Koyuncu, 2014)

Atıksu arıtımında birincil – ikincil ve ileri arıtma olmak üzere üç yöntem kullanılmaktadır. Birincil veya ön arıtım fiziksel işlemlerin uygulandığı aşama, ikincil arıtım ise biyolojik veya kimyasal işlemlerin uygulandığı aşamayı ifade etmektedir (G. Şener, 2016).

2.2.2.1. Birincil arıtma

Atıksu içerisindeki çökebilir ve yüzebilen farklı boyutlardaki katı maddeleri uzaklaştırmak amacı ile tesise gelen su ilk olarak fiziksel arıtma ünitelerinden geçer.

Fiziksel arıtma üniteleri;

- **İzgaralar:** Atıksuda bulunan katı atıkların, diğer proses aşamalarındaki ekipmanlara zarar vermemesi için ve arıtma sistemine gelen atıksuyun kirlilik yükünü azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

- **Kum tutucu:** Atıksudaki organik olmayan kum, çakıl gibi atıkların, arıtım kademelerindeki ekipmanların tahribatını ve çökeltim havuzlarındaki tıkanmaları önlemek için kullanılmaktadır.
- **Yüzer madde tutucu:** Yoğunluğu sudan daha düşük olan yağ, gres, solvent gibi yüzer maddelerin hem geri kazanımını sağlamak hem de arıtma verimini yükseltmek amacı ile yüzer madde tutucular kullanılır.
- **Dengeleme Havuzları:** Atıksu karakteristiklerindeki değişiklikleri (debi, kirlilik yükü, pH) minimize ederek proses aşamalarındaki optimum şartları sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.
- **Çökeltim havuzları:** Yoğunluğu sudan daha fazla olan askıda katı maddelerin, belirli bir süre bekletilerek kendiliğinden çökmesini sağlayarak ya da kimyasal ve biyolojik yöntemlerle yoğunluğu sudan daha büyük yumaklar haline getirilen partiküllerin yer çekimi etkisiyle çökelttilerek atıksudan giderildiği ünitelerdir (AAT Teknik Usuller Tebliği, 2010; Metcalf & Eddy, 2003; Özel, 2011).

2.2.2.2. İkincil arıtma

Atıksudaki çözünmüş, askıda ve koloidal maddelerin giderilmesinde kimyasal reaksiyonların kullanıldığı proseslere kimyasal arıtma denir. Kimyasal arıtma prosesleri daha çok inorganik yükü fazla olan özellikle endüstriyel nitelikli atıksuların arıtımında kullanılır (Özel, 2011).

Kimyasal arıtma uygulamaları;

- **Nötralizasyon:** Asidik ve bazik karakterdeki atıksuların alıcı ortama deşarj standartlarını sağlaması, biyolojik arıtma öncesi ve kimyasal çöktürme işleminde reaksiyonların gerçekleşeceği uygun pH değerinin sağlanması için yapılan asit veya baz ilave işlemidir.
- **Koagülasyon:** Koagülant olarak adlandırılan kimyasal maddelerin (polielektrolit, kireç, alüm, demirsülfat, demir klorür gibi maddeler), uygun pH da atıksuya ilavesi ile koloidal ve askıda katı maddelerin birleşerek flokların oluşmasına hazır olma aşamasıdır.
- **Flokülasyon:** Koagülasyon sonunda oluşturulan küçük pıhtılaşmış taneciklerin birbiriyle birleşerek kolay çökebilmesi için uygun hızda karıştırılarak flokların oluşturulduğu aşamadır. Bu aşamadan sonra çökeltim tankında floklar çöktürülerek atıksudan uzaklaştırılır (AAT Teknik Usuller Tebliği, 2010; Metcalf & Eddy, 2003; Şener, 2016).

Biyolojik arıtma, atıksudaki organik ve bazı inorganik maddelerin, sudaki bakteriler yardımıyla parçalanması ve bakterilerin bünyelerine alması sonucu atıksudan giderilme aşamalarıdır. Yaygın olarak organik yükü fazla olan özellikle evsel nitelikli atıksuların arıtılmasında kullanılmaktadır (AAT Teknik Usuller Tebliği, 2010; Metcalf & Eddy, 2003; Özel, 2011; Şener, 2016).

Atıksu arıtımında uygulanacak yöntem ve prosesler atıksu karakterizasyonuna, seçilecek proseslerin birlikte kullanılabilirliğine, arıtılmış suyun kullanım alanına, deşarj

standartlarına ve proseslerin çevresel ve ekonomik fizibilitesine bağlı olarak belirlenmektedir. Atıksu arıtımında kullanılan başlıca biyolojik arıtım prosesleri aşağıda verilmiştir (C. Öztürk, 2007).

- Aktif çamur prosesi (AÇP)
- Damlatmalı filtreler
- Biyodiskler
- Havalandırılmalı lagünler
- Stabilizasyon havuzları
- Anaerobik filtre
- Yukarı akışlı çamur yatağı
- Yapay sulak alanlar

Bu arıtma yöntemlerin içerisinde en yaygın kullanıma sahip olan proses, AÇP ve modifikasyonlarıdır. AÇP'nin temel çalışma prensibi, "aktif çamur" olarak adlandırılan biokütle – su karışımının havalandırma havuzu içerisinde mikroorganizmaların oksijen kullanarak organik maddeyi parçalama işlemine dayanmaktadır (C. Öztürk, 2007).

2.2.2.3. İleri arıtım

Klasik arıtma sistemleri karbon gideren sistemlerdir, bunun yanı sıra atıksuda kalan AKM, çözünmüş madde ve azot – fosfor gibi organik kirleticilerin giderimi istenildiğinde kullanılan arıtma sistemlerine ileri arıtma prosesleri denir.

- **Azot giderme:** Atıksuyun içerdiği amonyum iyonları azot bakterileri yardımıyla nitrifikasyon kademesinde ilk nitrite ve sonra da nitrata dönüştürülür. Denitrifikasyon kademesinde ise anoksik şartlar altında azot gazı halinde sudan uzaklaştırılır.
- **Fosfor giderme:** Fosfor bileşiklerini gideriminde kimyasal ve biyolojik metotlar birlikte veya ayrı ayrı kullanılır. Kimyasal arıtmada, kimyasal maddeler kullanılarak yüksek pH değerinde fosfor, fosfat tuzları halinde çöktürülür. Biyolojik metotlarla fosfor arıtımı ise biyolojik arıtma sırasında fosfatın mikroorganizmalarca alınması ile sağlanır (G. Şener, 2016).

2.2.2.4. Çamur arıtımı

Atıksularda giderim aşamalarında çökelen ya da yüzen katı maddeler olarak ortaya çıkan arıtma çamurunun da yüksek miktarda organik madde, besi maddeleri, patojen mikroorganizmalar gibi çevreye zararlı kirleticiler içermesinden kaynaklı arıtılmaları gerekmektedir (Ş. Yıldız vd., 2009). Birincil arıtmadan çıkan çamur ham atıksuyun taşıdığı çökelebilen katılardan oluşur. İkincil arıtmadan çıkan çamur ise biyolojik ve çökelebilen katılardan ileri arıtım sistem çamuru ise biyolojik ve kimyasal çamurdan oluşur. Her aşamadan gelen çamur farklı özellikte olduğu için çamur arıtım

aşamalarına geçmeden önce ilk olarak homojen bir karışım elde etmek için karıştırma işlemine tabi tutulur (Metcalf & Eddy, 2003; İ. Öztürk vd., 2015).

- **Çamur yoğunlaştırma:** Yoğunlaştırma, çamur içeriğindeki sıvının bir kısmının uzaklaştırılarak katı madde konsantrasyonunun artırılması işlemidir. Bu şekilde çamur hacmi azalır ve çamura uygulanacak diğer aşamalardaki verimi artırır. Graviteli, santrifüjlü, flotasyonlu ve bantlı en yaygın kullanılan yoğunlaştırıcılardır.
- **Çamur stabilizasyonu:** Stabilizasyon, arıtma çamurundaki patojenlerin azaltılması, istenmeyen kokuların giderilmesi, kokuşma, çürüme ve bozulma gibi problemlerin önlenmesi amacıyla uygulanmaktadır. Koku, bozunma ve çürüme gibi problemlerin ana kaynağı mikroorganizmaların çamurda gelişmeleri ile gerçekleşmektedir. Bu sebeple mikroorganizmaların gelişimini engellemek için uçucu veya organik bileşiklerin gidermek ya da mikroorganizmaların gelişemeyeceği çevresel koşulları uygun kimyasallarla oluşturmak gerekir. Çamur stabilizasyonunda kullanılan başlıca yöntemler, kireçle (kimyasal) stabilizasyon, havasız çürütme, havalı çürütme, ısıtma ve kompostlamadır.
- **Çamur susuzlaştırma ve kurutma:** Susuzlaştırma ve kurutma, çamurun su içeriğinin azaltılması için uygulanan fiziksel bir işlemdir. Hacmi azalmış çamurun nakliye masraflarından, akabinde gelen arıtma ünitelerinde kullanılacak ekipmanların kapasite ihtiyacını azaltmaktadır. Ayrıca, çamurdaki fazla nemin giderilmesi ile kokuşmaya elverişsiz kek oluşumunu sağlamakta ve tercih edilirse düzenli depolamada sahalarda meydana gelebilecek sızıntı suyunu azaltmaktadır. Çamurun susuzlaştırma ve kurutma işleminde, buharlaşma ve süzülme gibi doğal yöntemlerin yanı sıra daha hızlı olmasından dolayı yaygın olarak kullanılan mekanik yöntemler; santrifüj, kurutma yatakları, pres filtre, bant filtre ve lagünlerdir. Kurutulan çamur kompostlaştırma, termal bertaraf ve arazide uygulama gibi yöntemlerle bertaraf edilir (Metcalf & Eddy, 2003; İ. Öztürk vd., 2015).

2.2.3. Atıksulardan ağır metallerin gideriminde kullanılan metotlar

Gelişen teknoloji ve sanayileşmenin etkisiyle ağır metallerin kullanım alanları arttığı için her geçen gün atıksudaki yükleri de artmaktadır. Ağır metaller insanlara ve doğal yaşama olan toksik etkileri sebebiyle atıksulardan giderilmesi gereken önemli kirleticiler arasındadır. Ayrıca, biyolojik olarak ayrışmayan bu kirleticiler besin zincirine girerek canlı dokularında birikime sebep olup ekosistem üzerinde olumsuz etkilere sebep olduğu için de giderilmesi önemlidir (Aslan vd., 2007). Genel atıksu arıtım yöntemleriyle giderilmesi pek mümkün olmadığı için ağır metal giderimlerinde genellikle iyon değişimi, kimyasal çöktürme, adsorpsiyon prosesleri, koagülasyon, flotasyon ve membran filtrasyon teknolojileri kullanılmaktadır.

2.2.3.1. Membran filtrasyonu

Membran filtrasyon prosesleri sadece organik bileşikler ve askıda katıların gideriminde değil aynı zamanda ağır metaller gibi inorganik kirleticilerin gideriminde de etkilidir. Partikül boyutuna bağlı olarak ters osmoz, nanofiltrasyon ve ultrafiltrasyon gibi çeşitli membran filtrasyon yöntemleri ile ağır metal giderimi yapılabilir (Ş. Çay, 2013).

- **Ters osmoz:** Ters osmoz prosesi, sudan çözünebilir iyonların ve makro moleküllerin ayrılmasını amaçlamaktadır. Bu ayırma işlemi, basınç uygulanarak 4-10 µm'den küçük yarı geçirgen membrandan filtrelenerek gerçekleşmektedir. Bu prosesin, yüksek sıcaklıklara dayanma, yüksek akış hızı, endüstriyel proseslerde suyun geri kullanımı gibi avantajları mevcut olmasına rağmen pahalı ve enerji tüketimi fazla bir prosestir. Ayrıca, askıda katı ya da klor gibi maddeler membranın gözeneklerinde tıkanıklara neden olduğu için belli aralıklarla yenilenmesi gerekir. Metal giderimi yüksek basınçta daha fazladır fakat basınç arttıkça enerji tüketimi de artar (Ş. Çay, 2013; Hamutoğlu vd., 2012; Yalçın, 2012).
- **Ultrafiltrasyon:** Ters osmoz prosesinde olduğu gibi atıksuyun yarı geçirgen membrandan basınç ile geçirildiği bir prosestir (Yalçın, 2012). Ters osmoz prosesinden farkı daha düşük basınç uygulanması ve membran gözenek boyutunun daha büyük olmasıdır (Ş. Çay, 2013; Filiz, 2007; Güneş, 2018). Bu sebeple, genellikle koloidal maddelerin ve makro moleküllerin arıtılmasında kullanılır (Bektaş ve Altaş, 2016; Filiz, 2007; Güneş, 2018; Yalçın, 2012). Düşük basınçta çalıştığı için işletme maliyeti daha düşük olmasına rağmen fazla miktarda çamur oluşması önemli dezavantajlarından (Bektaş ve Altaş, 2016; Yalçın, 2012).
- **Nanofiltrasyon:** Nanofiltrasyon da yine ters ozmos prosesi gibi basınç ile atıksuyun membrandan geçirme prensibine dayanmaktadır. Moleküler ağırlık sınırı ters osmoz ve ultrafiltrasyon arasında yer alan bir membran filtrasyon yöntemidir (Aydiner, 2006; Uzun, 2013). Bu proseste eleme ve elektriksel etkiler hakimdir (Ş. Çay, 2013; Uzun, 2013). Nanofiltrasyon membranındaki anyonlar ile atıksuda bulunan zıt yüklü iyonlar arasında donnan potansiyeli denilen elektriksel çekim kuvveti ile giderim gerçekleşir (Ş. Çay, 2013).

2.2.3.2. İyon değişimi

İyon değişim yöntemi, çözelti içerisindeki iyonlarının katı bir yüzeyde elektrostatik kuvvetle tutulan benzer yüklü iyonlarla yer değiştirme ilkesine dayanır (Filiz, 2007). Ağır metal içeren atıksular için dünya çapında yaygın olarak kullanılan arıtım yöntemlerinden birisidir fakat ekonomik olmaması uygulanmasını sınırlamaktadır. Ayrıca, iyon değiştirici reçinede, ağır metallerden, kum, kil, koloidal silika, yağ, gres ve mikroorganizmalardan kaynaklı kirliliklerin yaşanması da bir dezavantajı olsa da bu durum için uygun temizleme programı uygulanarak eski verime döndürülebilmektedir (Ş. Çay, 2013; Çetin, 2004; Filiz, 2007).

2.2.3.3. Kimyasal çöktürme

Kimyasal çöktürme, atıksulardan ağır metal ve fosfor giderimi için en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir (Çetin, 2004). Bu yöntem, atıksudaki askıda ya da çözünmüş kirleticilerin kimyasal maddeler yardımıyla fiziksel durumunu değiştirerek çökelmelerini sağlayan bir arıtma işlemidir (Er, 2016; Yalçın, 2012). Ağır metallerin kimyasal çöktürme ile giderilmesinde en sık rastlanan çöktürme yöntemleri hidroksit ve sülfür çöktürmeleridir. Kostik veya kireç ilavesi ile hidroksit çöktürme yöntemi; işletim kolaylığı, ekonomik, kullanışlı ve güvenli bir yöntem olduğundan daha yaygın bir uygulama alanına sahiptir (Ş. Çay, 2013; Çetin, 2004). Fakat kimyasal çöktürme yöntemi ile kabul edilebilir deşarj limitlerini sağlamak için yüksek miktarda kimyasal ihtiyacı

vardır (Ş. Çay, 2013). Ayrıca, bu yöntemin önemli bir dezavantajı da toksik bileşenler içeren fazla miktarda çamur oluşumudur (Yalçın, 2012). Kimyasal olarak kireç uygulanmasının avantajları olsa da sadece kireç kullanıldığında arıtma çamur miktarında daha fazla artış gözlenmektedir. Bunu azaltmak için Demir (III) Klorür (FeCl_3) veya Demir Sülfat (FeSO_4) ile kullanılabilir (Er, 2016).

2.2.3.4. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, bir yüzeyinde veya iki faz arasındaki ara yüzey (bir sıvı ile bir gaz, katı veya başka bir sıvı arasındaki temas yüzeyi) üzerinde bir maddenin birikmesi ve derişimin artmasıdır. Bir başka ifade ile adsorpsiyon, moleküllerin, temas ettikleri yüzeydeki çekme kuvvetlerinden dolayı o yüzeye yapışması olarak da tanımlanır (Hamutoğlu vd., 2012; Yalçın, 2012). Atıksu arıtımında kullanılan adsorpsiyon, sıvı- katı adsorpsiyonu olup çözünmüş maddelerin ara yüzeyde dağılması ya da birikmesi, adsorban ve çözücünün relatif çekim kuvvetine bağlıdır (Çetin, 2004; Filiz, 2007). Adsorbe eden maddeye adsorbent, adsorbe edilen maddeye ise adsorbant denir. Adsorpsiyon ile giderimde, aktif karbon, zeolit, doğal ve yapay adsorbanlar gibi çeşitli adsorbent maddeler kullanılarak atıksudaki ağır metallerin tutulması şeklinde gerçekleşmektedir (Çetin, 2004). Bu yöntemin diğer ağır metal arıtmalarına göre daha ekonomik ve kolay rejenere edilebilen bir metot olması kullanımını artırmaktadır (Yalçın, 2012). Adsorpsiyon ile giderimde fiziksel, kimyasal, biyolojik ve iyonik olmak üzere dört çeşit adsorpsiyon mevcuttur (Çetin, 2004; Yalçın, 2012).

2.2.3.5. Koagülasyon

Koagülasyon prosesi, kirleticilerin koagülantların eklenerek sedimantasyonuna dayanır. Koagülant ile kirleticilerin oluşturduğu flokların giderilmesi için koagülasyon işlemini flokülasyon takip eder (Ş. Çay, 2013). Bu yöntem ile ağır metal giderimi için uygun pH'nı ayarlanması ve metal türlerine göre kimyasalların ayarlanması önemlidir. Mesela, civa iyonlarını gidermede demir(III) klorür; kireç veya alum'dan daha çok etkiliyken, alum ise nikel ve çinkoyu gidermede daha etkilidir (Çayıldak vd., 2016). Bu prosesin en önemli dezavantajlarından birisi çamur hacminin yüksek olmasıdır (Ş. Çay, 2013).

2.2.3.6. Flotasyon

Flotasyon yönteminde, sıvı ortama verilen gaz kabarcıklarının sıvı fazda bulunan diğer sıvı ya da katı parçacıkların etrafına tutunarak yukarıya doğru hareket etmesiyle ayrılan arıtma yöntemidir (Arslan, 2008; Ş. Çay, 2013; Uzun, 2013). Bu işlem sonrasında yüzeyde biriken maddeler sıyrıcı ile uzaklaştırılır, arıtılmış su ise daha derin kısımda toplanır (Ş. Çay, 2013). Flotasyon yöntemi, çözünmüş hava flotasyonu, vakum – hava flotasyonu, dağılmış hava flotasyonu, biyolojik flotasyon, elektroflotasyon olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Atıksudan ağır metal gideriminde en yaygın kullanılan yöntem çözünmüş hava flotasyonudur (Ş. Çay, 2013; Uzun, 2013).

Son yıllarda ağır metal gideriminde, flotasyonun tek başına kullanıldığı sistemlerdense flotasyonla birlikte fizikokimyasal (aktif karbon ve filtrasyon) yöntemlerin kullanıldığı sistemler üzerinde çalışılmaktadır (Uzun, 2013). Flotasyon prosesinin kullanımının çok fazla tercih edilmesindeki sebepler kısa hidrolik bekleme

süresi, küçük boyuttaki partiküllerin gideriminde etkili olması, az konsantre çamur üretimi ve düşük maliyet gibi avantajlarının olmasıdır (Ş. Çay, 2013; Çetin, 2004).

2.3. Atıksu Arıtma Tesislerinde Ağır Metallerin Akıbeti: Literatür Taraması

Geleneksel AAT'ler, genel olarak, atıksuyun konvansiyonel parametreleri olan BOİ, KOİ, AKM ve biyolojik olarak bozunabilir organik maddelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle atıksudan giderilmesi için tasarlanmış olup yurdumuz da dahil pek çok ülkede çoğunlukla AÇP kullanılmaktadır (Karvelas vd., 2003). Fakat özellikle kanalizasyona bağlanan endüstriyel atıksu girişleri de düşünüldüğünde AAT'ler ağır metal giderimine uygun olmadığı görülmektedir (Üstün, 2009). Ayrıca bu arıtma tesislerinde atıksuyun arıtılması kadar arıtma aşamasında oluşan çamurun da uygulanacak bertaraf yöntemine uygun koşullara getirilmesi önemlidir. Bu sebeple ağır metallerin çevreye olan zararlı etkileri ve gelecekte daha sıkı yasal sınırlamaların olacağı düşünülerek arıtma tesislerinin hem atıksudaki hem de arıtma çamurundaki ağır metal giderimleri geliştirmeleri gereklidir. Bunun için metallerin atıksu içerisindeki davranışları, akıbeti ve dağılımlarını bilmek önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde, AAT'lerdeki ağır metaller üzerine yapılan izleme çalışmalarında çoğunlukla tesislere giriş, çıkış ve tesislerde üretilen çamurdaki metal seviyelerine yoğunlaşmıştır ve ağır metallerin akıbeti ve dağılımları üzerine daha az sayıda çalışma mevcuttur (Cantinho vd., 2016). Bu az sayıdaki verilere göre atıksudaki ağır metal davranışları hakkında henüz genel geçer bir sonuç elde edilmediği için bu bölüm literatürdeki çalışmalar ele Çizelge 2.4'de bu bölümde değerlendirilen çalışmalar ve araştırılan AAT'ler hakkında tamamlayıcı verileri içermektedir. Çizelge 2.5'de her çalışma tarafından sağlanan bilgilere göre arıtma aşamalarındaki sonuçlar mevcuttur. Bazı çalışmalardaki veriler, Cantinho vd. (2016)'nin yapmış olduğu çalışmadaki verilerden alınmıştır. Bu çizelgede görüldüğü üzere ağır metal dağılımlarında oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sebeple atıksu davranışlarını daha iyi anlayabilmek için AAT'lerde Metallerin Giderim Mekanizmaları, Giderim Performansı, Arıtma Aşamalarında Metallerin Dağılımı, Çamur Kalitesi ve Faz Dağılımı başlıkları altında incelenmiştir.

Çizelge 2.4. Literatürde incelenen AAT'lere ait temel bilgiler

Arıtma tesisi	Ağır metal analizi yapılan arıtma aşamaları		Periyot	Ağır metaller
	Atıksu	Çamur		
5 adet AAT, Sevilla, İspanya (Alvarez, Mochon, Sanchez ve Rodriguez, 2002)		* Birincil çamur * İkincil çamur * Susuzlaştırılmış çamur * Kompost		Al, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Pb, Ti ve Zn
Fusina AAT, Venedik, İtalya (Busetti, Badoer, Cuomo, Rubino ve Traverse, 2005)	* Sadece evsel atıksu girişi * Karışık atıksu girişi (evsel + endüstriyel) * Çıkış suyu		Temmuz 2001- Mayıs 2002	Al, Ag, As, Ba, B, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Cu, V, Hg ve Zn
Seine Aval AAT, Paris, Fransa (Buzier vd., 2006)	* Hamsu * Birincil arıtım sonrası * Biyolojik arıtım sonrası * Üçüncül arıtım öncesi ve sonrası		Mart – Nisan 2004 (29/03-14/04-19/04-21/04-26/04-28/04)	Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni ve Pb

Çizelge 2.4'in devamı

Arıtma tesisi	Ağır metal analizi yapılan arıtma aşamaları		Periyot	Ağır metaller
	Atıksu	Çamur		
5 AAT, İtalya (Carletti vd., 2008)	* Hamsu * Çıkış suyu	* Aktif çamur * Anaerobik çürütülmüş çamur	18 Aylık süreçte	As, Al, Cd, Fe, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn
Gdansk AAT, Polonya (Chipasa, 2003)	* Hamsu * Çıkış suyu	* Açık Anaerobik çürütücü girişi (karışık çamur) * Açık Anaerobik çürütücü çıkışı	1998-2000 (2 yıl boyunca ayda 1 kez)	Cd, Pb, Cu ve Zn
Thohoyandou AAT, Güney Afrika (Edokpayi vd., 2015)	* Ham atıksu * Kum tutucu sonrası * Birincil çökeltim sonrası * İkincil çökeltim sonrası * Çıkış suyu		Ocak - Haziran 2014 (Ayda 1 kez)	Al, Fe, Zn, Cr, Cu, Mn ve Pb
Whitlingham AAT, Norwich, İngiltere (Goldstone vd., 1990a, b, c)	* Hamsu * Hamsu + Geri devir * Çöktürülmüş atıksu * Çöktürülmüş atıksu + Aktif çamur * Çıkış suyu * Karışık sıvı	* Geri devir aktif çamur * Birincil çamur	Mayıs 1986	Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Hg ve As
Veszprém AAT, Macaristan (Gulyas vd., 2015)	* Hamsu * Birincil çökeltim öncesi ve sonrası * İkincil çökeltim sonrası * Geri devir suyu (reject water)	* Birincil çamur * İkincil çamur * Final çamuru		Cd, Co, Mn, Ni, Cr, Cu, Fe ve Pb
Selanik AAT, Yunanistan (Karvelas vd., 2003)	* Hamsu * Birincil çökeltim sonrası * İkincil çökeltim sonrası	* Birincil çamur * Aktif çamur * Final çamuru	Kasım – Aralık 2001 (İki haftada bir 5 gün üst üste, hafta sonu hariç)	Cd, Pb, Mn, Cu, Zn, Fe ve Ni
Ribeirão Preto AAT, São Paulo, Brezilya (Oliveira vd., 2007)	* Hamsu * Çıkış suyu	* Final çamuru	Haziran-Ağustos 2004	Cd, Cr, Cu, Mn, Hg, Pb ve Zn
7 adet AAT, İsveç (Olofsson vd., 2013)		* Susuzlaştırılmış (anaerobik) çamur * Stabilize (aerobik) çamur	Sonbahar 2004	As, Cd, Co, Cr, Hg, Ni, Pb, Cu, V ve Zn
Doğu ve Batı AAT, Bursa, Türkiye (Kaynak ve Taşdemir, 2003)	* Hamsu * Çıkış suyu		01.10.2001 ile 25.12.2001 tarihleri arasında yaklaşık 2 ay boyunca, haftanın beş iş günü	Ag, Al, As, Bor, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn ve Zn
Doğu ve Batı AAT, Bursa, Türkiye (Salihoglu, 2013)	* Hamsu * Çıkış suyu	* Final çamuru (Susuzlaştırılmış çamur)	Mart 2007 - Ağustos 2009 (Haftalık)	Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn ve Zn
Doğu AAT, Bursa, Türkiye (Üstün, 2009)	* Hamsu * Atıksu stabilizasyon havuzlarının girişi ve çıkışı * AÇP'nin girişi ve çıkışı * Çıkış suyu * Deşarj edilen Nilüfer nehri		Ocak - Aralık 2002 arası Atık stabilizasyon havuzundan, Ocak - Kasım 2007 arası AÇP'den	Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn

2.3.1. AAT'lerde metallerin hamsudaki konsantrasyonu ve giderim performansı

Tesise gelen atıksu içeriği tesisin işleyişini belirleyen en önemli parametrelerdendir. Literatür sonuçları karşılaştırıldığında özellikle hamsuda bulunan ortalama metal konsantrasyonları geniş aralıkta dağılmış ve her tesis için farklı sonuçların olduğu gözlenmektedir. Bu durumun tesisin bulunduğu yerleşkedeki tesise gelen atıksuyun farklı kaynaklardan gelmesiyle ilgili olabileceği düşünülmektedir. Carletti vd. (2008), İtalya'daki farklı endüstriyel faaliyetlerden atıksu girdilerine sahip beş büyük AAT izlemiş ve benzer endüstriyel katkıya sahip AAT'lerinde bile (Cr, Ni, Zn gibi) bazı metallerde gözle görülür farklılıklar belirlemiştir. Çalışmaların ham atıksu değerlerine baktığımızda genel olarak (bazı istisnalar hariç) ham sudaki en yüksek konsantrasyona sahip metaller Fe, Al, Zn, en düşük konsantrasyona sahip metaller Pb, Cd, Hg olmuştur (Çizelge 2.5). Edokpayi vd. (2015)'in çalışmasında Thohoyandou AAT'nin faz dağılımı ve giderim verimliliğini değerlendirmişlerdir ve sonuçlarda hamsudaki en yüksek metal konsantrasyonu Al ve Fe iken en düşük metal konsantrasyonu Cu ve Pb olmuştur. Benzer olarak, Gulyas vd. (2015)'nin çalışmasında en yüksek konsantrasyon Fe iken en düşük konsantrasyon Cd, Pb olmuştur. Buseti vd. (2005) İtalya'daki Fusina AAT'yi izlemişlerdir ve karışık atıksu girişinde en yüksek metal konsantrasyonu Fe ve Zn, en düşük metal konsantrasyonu Cd ve As olarak bulmuşlardır.

Ulusal bazda yapılan çalışmalar endüstriyel şehir olmasından dolayı genellikle Bursa şehrindeki AAT'de yapılmıştır. Çalışmaların farklı yıllarda yapılmasından kaynaklı bazı farklılıklar olsa da genel olarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Üstün (2009)'ün yapmış olduğu çalışmada Bursa Doğu AAT incelenmiştir ve ham atıksudaki en yüksek metal konsantrasyonu Fe, Al ve Cr olurken en düşük metal konsantrasyon Cd, Pb ve Cu olmuştur. Salihoglu (2013) ise Bursa'daki iki AAT'yi (Doğu ve Batı) izlemiştir. Doğudaki AAT sonuçlarına göre Üstün (2009)'ün çalışmasına benzer şekilde en yüksek metal konsantrasyonu Fe ve Al, en düşük metal konsantrasyonu Cd, Pb, Cu olarak gözlemlenmiştir. Batıdaki sonuçlarda ise Doğudaki sonuçlara benzer şekilde Fe, Al ve Zn en yüksek metal konsantrasyonu olarak sonuçlanırken en düşük metal konsantrasyonları Cd, Cu ve Ni olarak sonuçlanmıştır. Doğu ve Batıdaki bu benzer ağır metal girişlerinin sebebinin benzer sanayi atıksularının girişi olduğu için olduğu düşünülmektedir.

Karvelas vd. (2003)'nin yapmış olduğu çalışmada Selanik şehrinin AAT'deki ağır metallerin varlığı ve akıbeti araştırılmıştır. Goldstone vd. (1990a, b, c) İngiltere Norwich kentindeki Whitlingham AAT'yi izlemişlerdir. Selanik'te ve Whitlingham 'da yapılan çalışmalara göre hamsudaki metal konsantrasyonlarında diğer çalışmalardan farklı olarak Ni (Selanik), Pb ve Cu konsantrasyonları daha yüksek çıkmıştır. Oliveira vd. (2007), Ribeirão Preto Biyolojik AAT'nin giriş ve çıkış akımındaki ağır metallerin varlığını ve aynı zamanda atıksudaki ve çamurdaki ağır metal içeriğini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, atıksuyun metal bileşimi karışık ve son derece değişken olduğunu belirlemişlerdir. Örneklem sürecindeki metal seviyelerindeki değişimlere bakıldığında zaman da Cu, Hg ve Zn seviyelerindeki değişimlerin Cd, Mn ve Pb'dekinden daha büyük olduğu görülmüştür. Mn'deki değişim de Cd ve Pb'ye göre dikkate değer olduğu görülmüştür. Bir benzer sonuçlar da Chipasa (2003)'nin yapmış olduğu çalışmada elde edilmiştir. Bu çalışmada Polonya'daki Gdansk AAT'deki Cd, Cu, Pb ve Zn metallerin giderimi ve birikimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Oliveira vd. (2007)'nin sonuçlarına benzer olarak Cu ve Zn içeriklerindeki değişimler Cd ve Pb içeriklerindeki değişimlerden daha belirgin olmuştur.

Her metal için giderim verimleri çok geniş aralığa sahiptir. Birkaç istisna hariç tüm çalışmalarda en uyumlu giderim verimi Ni' de (%40-60 aralığında) görülmüştür (Cantinho vd., 2016). Buzier vd. (2006), Fransa'daki Seine-Aval AAT'deki ağır metallerin davranışları üzerine çalışmıştır ve FeCl_3 ile üçüncül arıtmadan önce ve sonrasındaki giderim verimlerini belirlemişlerdir. Bu verileri karşılaştırdığımızda, FeCl_3 'ün reaktif bileşimindeki içeriği nedeniyle Ni hariç FeCl_3 ile arıtımın sıvı fazdan metal giderimini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu tür kimyasal ilavelerinin genelde asıl amacı metal giderimini artırmak ya da geliştirmek değil, fosfor giderimini sağlamak içindir (Cantinho vd., 2016). Bazı çalışmalarda çıkış akımında ağır metal konsantrasyonlarının arttığı ve giderimin yetersiz kaldığı sonucu çıkmıştır. Mesela, Carletti vd. (2008)'nin yapmış olduğu çalışmadaki B kodlu AAT tesisinde Cu, Ni ve Pb de, D kodlu AAT tesisinde Pb de, Buzier vd. (2006)'in yapmış olduğu çalışmada ise Ni de artış gözlenmiştir. Bu durum incelenen ilk AAT için katı fazın işlemlerindeki bir arızadan kaynaklanabileceği gibi birçok sebebi olabileceğinden kesin bir gerekçe bulunamamıştır (Cantinho vd., 2016).

Chipasa (2003)'nın çalışmasında metal gideriminin sırası ($\text{Cd} < \text{Pb} < \text{Cu} < \text{Zn}$) ile ham sudaki metal konsantrasyonunun sırasının ($\text{Cd} < \text{Pb} < \text{Cu} < \text{Zn}$) doğru orantılı olduğu sonucuna ve Cd ve Pb nin konsantrasyonlarının sırasıyla $20\mu\text{g/L}$ ve $50\mu\text{g/L}$ olmasıyla düşük giderim gerçekleştiği sonucuna varmıştır. Fakat bu durum diğer çalışmalarla çok da uyumlu görülmemektedir. Özellikle de Cd için daha düşük konsantrasyonlarda bile önemli derecede giderim gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca metal giderimi ve metal konsantrasyonu ile ilgili de diğer çalışmalarda doğru bir orantı gözükmemektedir (Cantinho vd., 2016).

Ulusal bazlı çalışmalarda aynı arıtma tesisi olmasına rağmen farklı sonuçlar elde edilmiştir. Salihoglu (2013)'nin çalışma sonuçlarına göre toplam Cr, toplam Fe, Al ve Cu için %75'in üstünde giderme verimliliği elde edilirken, As, Cd, Pb, Sb ve Sn için önemli bir giderim gözlenmemiştir. Üstün (2009)'ün çalışma sonuçlarında ise stabilizasyon havuzlarında, giderim verimi Cr için %58 iken Cd, Mn ve Pb için %20'den az olmuştur. AÇP'de giderim verimleri ise Ni için %47 ve Cr için %95 arasında değişmektedir. Kaynak ve Taşdemir (2003), Bursa Büyükşehir Belediyesi'ne ait mevcut AAT'lerindeki (Doğu AAT ve Batı AAT) ana ünite olan anaerobik stabilizasyon havuzlarının ağır metal giderim verimlerinin araştırmıştır. İncelediği metallerin ortalama giderim verimleri %7 ile %65 arasında değişmiştir.

Ağır metallerin giderim verimliliği, pH, başlangıç metal konsantrasyonu, atıksuyun bileşimi, tesisin çalışma koşulları, atıksu kaynakları gibi bir dizi faktörden etkilenmektedir (Chipasa, 2003; Edokpayi vd., 2015). Ayrıca, her çalışmada farklı giderim verimlerinin gerçekleşmesinin, metal konsantrasyonlarını farklı analitik yöntemlerle ölçmekten farklı işletme koşullarına kadar birçok nedeni de olabilir (Cantinho vd., 2016). Metallerin gideriminde özellikle pH'ın önemi büyüktür (Edokpayi vd., 2015). Her metalin çökeltme pH aralığı bile farklı olduğu için arıtma tesislerindeki pH farklılıkları da giderim ve dağılım sonuçlarındaki farklılıkları açıklayabilir. Kaynak ve Taşdemir (2003)'in çalışmasında tesisteki pH değeri 7-8 aralığında olduğu için Ni giderimi Cu'dan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Oliveira vd. (2007)'de atıksu numunelerinin pH değerlerinin özellikle Mn ve Cr giderimini etkilediğini bildirmişlerdir.

2.3.2. AAT’lerde metallerin giderim mekanizmaları

AAT’de mikro kirleticilerin akışını genel olarak belirleyen üç ana mekanizma sorpsiyon, biyolojik dönüşüm (biyolojik bozunma) ve uçucu hale getirmedir. Sorpsiyon ve uçucu hale getirme, iki faz arasındaki, sırasıyla çözünmüş-katı ve çözünmüş-gaz fazı arasındaki denge mekanizmalarına dayanan bir mikrokirletici transfer işlemiyken biyolojik bozunma, mikro kirleticinin çözünmüş veya katı fazdan giderilmesini ifade eder. Bu yüzden, bu üç mekanizma arasında, sorpsiyon işlemi genellikle metallerin giderilmesi için ilk akla gelen olsa da, organik maddeyle temas halindeyken uçucu bileşikler oluşturabilen bazı metaller (As, Hg) için kesinlikle uygulanabilir değildir (Cantinho vd., 2016).

Metaller AAT’ye çeşitli formlarda (çözünür, organik olarak kompleks, çökelmiş ve fiziksel olarak organik maddeye sorblanmış) girerler ve giderim sırasında belirli bir metal için form dağılımı organik ligandların parçalanmasına, biokütle alımına ve pH’daki değişiklikler göre şekillenebilir (Cantinho vd., 2016). Wang vd. (2006), çalışmalarında birincil çamurla metal alımının pH’dan önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir.

Diğer yandan AÇP’nin çalışma parametrelerinin metal giderimi üzerine olan etkileri uzun yıllardır araştırılmaktadır. Clara vd. (2005), çamur yaşının, AÇP’deki bazı organik mikro kirleticilerin giderilmesine ilişkin kritik bir parametre olabileceği sonucuna varmıştır. Ayrıca askıda katılar metallerin sorpsiyon/desorpsiyon mekanizmalarını etkiler. Bu sebeple çamur yaşı, aerobik biyolojik reaktörde baskın olan bakteriyolojik büyüme fazı ve askıda katıların durumu ile ilişkilendirildiğinde metaller için de aynısı geçerli olabilir (Cantinho vd., 2016).

2.3.3. Arıtma aşamalarında metallerin dağılımı

Arıtma aşamalarındaki metal içerikleri metallerin atıksu içerisindeki dağılımları hakkında bilgi sağlamaktadır. Fakat literatürde bu konuda çok fazla çalışma mevcut değildir. Karvelas vd. (2003)’nin çalıştığı Selanik AAT’de sıvı fazdaki yani birincil çökeltim ve çıkış suyundaki metallerin birbirlerine göre miktarları ham sudaki ile aynı oranda olmuştur. Bu durum, arıtma adımlarından metallerin neredeyse aynı şekilde etkilendiğini göstermektedir. Katı fazda yani çamurda ise bu oranların farklı olduğu görülmüştür. Sıvı fazda Ni yüzdesi %54-55 iken katı fazda ise bu değer %4-7 arasında olmuştur. Katı fazda Ni yüzdesinde belirtildiği gibi önemli miktarda az görülürken Cu ve Zn yüzdeleri sıvı faza göre önemli miktarda fazladır. Whitlingham AAT’de ise metallerin davranışları oldukça farklı olmuştur (Goldstone vd., 1990a, b, c). Son çıktı suyundaki Pb yüzdesi ham sudakinden neredeyse 3 kat azalma görülürken Zn ve Ni yüzdeleri ise hamsudakinden Zn için yaklaşık 2, Ni için 3 kat artışı görülmüştür. Bunun sebebi, biyolojik reaktöre anaerobik çürütücü ve aktif çamur geri döngüsündeki bazı metallerin yüzdelerindeki farklılıklar olabilir. Pb’nin hamsu + anaerobik çürütücü geri döngüsündeki yüzdesi önemli miktarda azalırken, Cu’nun yüzdesi hamsu + anaerobik çürütücü geri döngüsünde ve birincil çöktürücü çıktısı + aktif çamur geri döngüde artmış ve Zn birincil çöktürücü çıktısı + geri devir aktif çamurda azalmıştır. Karvelas vd. (2003)’nin çalışmasında olduğu gibi Goldstone vd. (1990a, b, c)’nin yapmış olduğu çalışmada da çamurdaki Ni yüzdesi düşük olmuştur. Ayrıca Pb yüzdesi de hamsu yüzdesinin yarısı kadar azalırken Cu yüzdesi de özellikle ikincil çöktürücü çamurunda

önemli miktarda artmıştır. Bir başka çalışma olan Carletti vd., 2008'in yapmış olduğu çalışmada ise sonuçlar oldukça değişken olmuştur ve bu 5 AAT'nin bazıları Karvelas vd. (2003)'nin sonuçlarına, bazıları ise Goldstone vd. (1990b)'nin sonuçlarına benzer olmuş, bazılarında E kodlu AAT'deki gibi Ni yüzdesi çıkış suyunda susuz çamurdan daha düşük olduğu gibi farklı olmuştur.

Literatürdeki metal dağılımları üzerine yapılmış bu az sayıdaki çalışmaların sonuçlarında farklılıklar gözlense de genel olarak Ni'nin daha çok sıvı fazda, Cu'nun da katı fazda olduğu görülmektedir. Sonuç olarak her metal için faz dağılımı farklı olduğu gibi tesisten tesise de farklılık göstermektedir. Bu durum tesisin çalışma koşullarına (pH gibi) bağlı olabilir.

2.3.4. AAT çamurlarının kalitesi ve ağır metaller

AAT'de nihai ürün sadece atıksu olmayıp aynı zamanda çamur da üretilmektedir. Ayrıca ağır metallerin atıksudan bir miktar giderildiği düşünülse de aslında ağır metallerin konsantrasyon olarak arıtım sırasında oluşan çamura geçtiği bilinmektedir ve nihai çamurun imhası için en çok kullanılan yöntemlerden birisi arazide gübre olarak kullanımıdır. Çamurun yıllık üretiminin AB ülkelerinde yaklaşık %37'si ABD'de %60'ı tarımda kullanılmaktadır (Cantinho vd., 2016). Bu sebeple çamur kalitesi de atıksu kalitesi kadar önemli bir konudur. Kentsel AAT'de atıksuların arıtılması sonucu oluşan çıkış suyu ve üretilen çamurdaki metallerin varlığı istenmeyen bir durumdur. Dolayısıyla deşarj edilen atıksular alıcı ortamı tehdit ederken özellikle çamur içerisinde yoğunlaşan ağır metaller de çeşitli sorunlar oluşturabilmektedir (Oliveira vd., 2007).

Bahsedilen bu metallerin yüzde dağılımları ile çamur kalitesi daha iyi değerlendirilebilir. Olofsson vd. (2013)'nin İsveç'deki 7 AAT'deki çamurda bulunan metalleri izlemişlerdir. İzledikleri İsveç AAT'lerin neredeyse hepsinde AÇP öncesinde fosfor giderimi için FeSO_4 kimyasal ilavesi ile susuzlaştırma öncesi bir polimer ilavesi gerçekleştirilmektedir. Aslında susuzlaştırma öncesi polielektrolit ilavesi birçok tesiste işletme verimliliğini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Olofsson vd. (2013)'nin bu çalışmasında yedi AAT'deki susuzlaştırılmış çamurdaki metal içerikleri; Zn için yaklaşık %50, Cu için %40'ın, Ni için %1–3, Pb için %2 - 4 düzeyinde olduğu, Cr için %2-10 ve As, Cd ve Hg için %0,6'nın altında olduğu belirtilmiştir. Buna göre, diğer çalışmalarda da çamurda en az bulunan metaller As, Cd ve Hg olmuştur. Ayrıca, Alvarez vd. (2002)'nin İspanya'daki 5 AAT'de çamurdaki metal içeriklerini inceledikleri çalışmada da Olofsson vd. (2013)'nin sonuçlarına benzer şekilde çamurdaki en yüksek metal içeriğine sahip metalin Zn'nin (%63,1) olduğu görülmektedir. Scancar vd. (2000) ise incelenen çalışmaların aksine, bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre susuzlaştırılmış çamurda önemli miktarda Ni bulunmuştur. Fakat genel olarak incelenen çalışmaların çoğunda en yüksek metal konsantrasyonları Zn ve Fe olmuştur.

Karvelas vd. (2003)'nin çamur örneklerinde en bol bulunan metal Zn iken en düşük metal Cd olmuştur. İncelenen tüm metaller, birincil çamur ve aktif çamurda benzer konsantrasyonlarda bulunurken susuzlaştırılmış çamurdaki konsantrasyonlarda, özellikle Pb için, 10-20 kat daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Bu artışın sebebinin anaerobik çürütme işlemi sırasında çamurun ağırlık kaybından kaynaklı olduğu belirtilmiştir. İncelenen diğer çalışmalarda da benzer şekilde susuzlaştırılmış çamurda ağır metal konsantrasyonları daha yüksek olmuştur. Chipasa (2003)'nin çalışmasında da anaerobik

stabilizasyon işleminde çamurdaki organik ve inorganik bileşikleri mikrobiyal ayrışması sonucu kuru ağırlık bazında ağır metallerin içeriklerinin arttığı sonucuna varmış ve çamurdaki metal artış sıralaması $Zn < Pb < Cu < Cd$ şeklinde elde edilmiştir. Gulyas vd. (2015), ise Macaristan'ın Veszprém AAT'deki atıksuda ve çamurda bulunan metal konsantrasyonlarını incelemişlerdir ve özellikle çamur konsantrasyonunda Fe için önemli bir artışın olduğu görülmüştür. Aynı zamanda giriş konsantrasyonundaki en yüksek metal de Fe iken çıkış suyunda en düşük metal olmuştur, bu durum Fe in atıksudan giderilip katı faza geçtiğini göstermektedir. Benzer şekilde Oliveira vd. (2007)'nin çalışmasında da son çamurdaki en yüksek metal konsantrasyonu Fe olmuştur.

Ulusal bazdaki çalışmalarda sadece Salihoglu (2013) susuzlaştırılmış çamurdaki metal içeriğini incelemiştir ve her iki tesiste de benzer sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek metal konsantrasyonları, Al, Fe ve Zn iken en düşük metal konsantrasyonları Mn, Cd ve Pb olmuştur.

Birkaç istisna dışında tüm AAT'lerinin son (susuzlaştırılmış) çamurdaki metal içerikleri, ilgili ülkelerinde uygulanan limit değerlere uygun sonuçlar çıkmıştır. Fakat İsveç'te belirlenen daha kısıtlayıcı sınırlarla karşılaştırıldığında bu sonuçların çoğunun bu limitleri karşılayamayacağı ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple çamurdaki metal içeriğini azaltmak gelecekte en büyük zorluklardan biri olacak ve çamur stabilizasyonu için geliştirmelerin yapılması gerekecektir (Cantinho vd., 2016).

2.3.5. Ağır metallerin farklı fazlardaki dağılımları

AAT'de metal giderim verimliliği esas olarak, sıvı ve katı fazlar arasındaki metal dağılımıyla ilişkilidir, ancak bu konuda sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Goldstone vd. (1990a, b, c)'nin çalışmasında elde edilen verilere bakıldığında, Cd, Cr, Cu ve Zn için hamsu + anaerobik çürütücü geri devir örneklerindeki çözünmüş faz, ham suya göre önemli miktarda azalmaktadır. Bu durum bu metallerin, anaerobik çürütücü geri devirde partikül fazda bulunduklarını göstermektedir. Aktif çamur geri devir akımının biyolojik reaktöre etkisine bakıldığında, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb ve Zn için çözünmüş fazlardaki oranları yarıdan fazla azalmaktadır. Bu durum bu metallerin aktif çamur geri devirdeki askıda katılara (AKM) büyük ölçüde bağlı olarak bulunduğunu göstermektedir. Ni 'deki azalma daha az gözlenirken As için gerçekleşen artış aktif çamur geri devirdeki çözünür fazın etkisini göstermektedir. Choubert vd. (2011) giderim verimlerini hamsudaki metallerin parçalanması ile ilişkilendirmişlerdir ve en yüksek giderim verimlerini yüksek tutunma oranına (partikül faz) bağlamışlardır. Cd, Cr, Cu, Pb ve Zn, çoğunlukla giriş suyunda partikül faza tutunmuş haldeyken (ortalama $f_{diss} \leq \%25$) Ni ve As orta derecede tutunmuştur (ortalama $f_{diss} = \%57-71$). Buzier vd. (2006), çalışmasında hamsu için Cd hariç diğer elde edilen veriler Choubert vd. (2011) ile benzer olmuştur. Aynı şekilde Karvelas vd. (2003)'nin çalışmasında da ham sudaki nikel (yaklaşık $\%75$) hariç tüm metallerin çözünmüş faz oranı $\leq \%25$ olmuştur.

Olofsson vd. (2013), Cu, Ni ve Zn'nin, çıkış suyundaki konsantrasyonlarının hamsudaki konsantrasyonlarıyla neredeyse aynı olduğunu ve bu nedenle, arıtma sisteminde çoğunlukla çözünmüş fazda bulunduğu, diğer metallerin ise partikül fazda olduğu sonucuna varmışlardır. Aslında, bu sistemlerdeki metallerin sorpsiyon davranışına ilişkin literatür deki sonuçlar çelişkili, tutarsız görünmektedir. Ruel vd. (2008), Cd, Pb ve Zn haricinde metallerin genel olarak arıtma aşamalarında adsorbe

edildiğini bildirmiştir (Cantinho vd., 2016). Stephenson vd. (1987), AÇP'de Cd, Cu ve Ni'nin giderim mekanizmalarıyla ilgili olarak, 20 yılı aşkın bir süre önce pilot ölçekli bir tesiste yapılan bir çalışmada Cd ve Cu'nun baskın olarak çözünmez olduğunu ve yüksek giderim verimleri elde edildiğini, buna karşılık Ni'nin çoğunlukla çözünür olduğu ve bu nedenle de kötü bir şekilde giderildiği sonucuna varmıştır (Cantinho vd., 2016).

Carletti vd. (2008) çalışmasında ultra filtrasyon membran ile donatılmış otomatik örnekleyici ile 5 AAT'den ham atıksuyun çözünmüş fazından eşzamanlı örnek alınmış ve daha çok endüstriyel kaynağa sahip AAT'lerde Hg, Cu ve Pb'nin çözünmüş fazda bulunma eğiliminde olduğunu, diğer AAT'lerde ise tüm metallerin genel olarak askıda fazda olduğu sonucuna varmışlardır.

Kaynak ve Taşdemir Bursa'daki iki arıtma tesisinin hamsu ve çıkış suyundaki çözünmüş metal yüzdeleri incelemişler ve hem hamsu hem de çıkış suyu için benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Bu durumu, her iki tesise gelen atıksuyun çözünmüş metal içerikleri bakımından benzer karakterde olduğunu belirterek açıklamışlardır. Arıtılmış atıksudaki çözünmüş oranlarının da benzer olması ile giderim veriminin de yakın olduğu görülmektedir. Her iki tesis için de çözünmüş metal oranları, Batı AAT tesisindeki çinko haricinde artmıştır ve bu da anaerobik stabilizasyon havuzunda partiküller kısmının çökmesi ile açıklanmıştır. Bu durum yukarıda da bahsedildiği gibi atıksudan çökeltme ile metal gideriminin gerçekleştiğini göstermektedir. Bu nedenle giderimi gerçekleştiren metallerin çıkış suyunda çözünmüş metallerin yüzdelерinin arttığı gözlenmektedir. Karvelas vd. (2003)'nin çalışmasında metallerin faz dağılımının metallerin türüne bağlı gibi görünmekte olup, metallerin atık suyun pH aralığında (7-9) suda çözünürlükleri farklı olan farklı kimyasal formlarda bulunduğunu belirtmiştir. Ayrıca, atık çamurda metallerin faz dağılımları üzerine çalışmalar, suda çözünür, değişebilir ve karbonla bağ yapmış türlerin en çok Ni ve Zn barındıran, organik madde sülfidlerin de Cr ve Cu'yu barındıran, demir/mangan oksitlerin ve hidroksitlerin Pb, Zn ve Ni barındıran önemli taşıyıcılar olduğu ve çamurdaki Fe ve Pb nin büyük bir kısmı da kristal fazdaki çamur partikülleri ile ilgili olduğunu göstermiştir (Karvelas vd., 2003).

2.4. Yasal Uygulamalar

Evsel, endüstriyel, tarımsal veya diğer kullanımlarla özelliği kısmen ya da tamamen değişmiş kirli sular arıtılmış olsun olmasın, atıksuların doğrudan veya dolaylı bir şekilde alıcı ortama (sulamadan dönen drenaj sularının kıydan veya uygun mühendislik yapıları kullanılarak toprağa sızdırılması hariç) veya sistemli bir şekilde yeraltına boşaltılması deşarj olarak tanımlanır (Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY), 2004; Dikmen, 2008). Atıksu içeriğinde, organik ve inorganik birçok kirletici parametre mevcuttur. Bu sebeple atıksuların alıcı ortama olan etkilerini en aza indirmek için atıksuların arıtılması ve belirli deşarj kriterlerinin olması önemlidir. Ülkemizde bu kriterler Çevre Kanunu kapsamı altında yer alan Su Kalite Kontrol Yönetmeliği (SKKY), Kentsel Atıksu Arıtma Yönetmeliği (KAAY) gibi içeriğinde birçok kirletici parametrelerinin deşarj kriterlerinin de bulunduğu yönetmelikler uygulanmaktadır.

Çizelge 2.5. Literatürdeki arıtma aşamalarındaki ağır metal konsantrasyonları (sıvı faz, µg/L; katı faz; mg/kg KM)

Referans	Tesis	Örnekleme	Al	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Alvarez vd., 2002	5 adet AAT, Sevilla, İspanya	Birincil çamur	6442-11 002			1,89-6,03	36,1-239	131-256	4472-13 847	<TLA		14,3-21,7	72,5-222	633-997
		İkincil çamur	4070-8683			1,68-4,44	23,2-245	145-278	1851-10 666	<TLA		9,80-18,2	47,2-142	519-883
		Susuzlaştırılmış çamur	8537-13 999			3,37-9,20	54,4-439	204-326	6082-16 794	<TLA		23,2-36,5	179-223	930-1636
		Kompost	12 972-13 350			3,30-5,09	161-351	298-406	7362-8673	<TLA		28,0-31,9	188-203	1503-2469
Busetti vd., 2005	Fusina AAT, Venedik, İtalya	EHA	2570	1.8	5.8	0.6	5.8	52	1420	8.0	56	8	13.3	206
		KHA	4320	26	8.4	1.0	17.8	108	4650	5.3	91	46	31.1	356
		Çıkış Suyu	422	3,3	3,0	0,3	3,7	13	940	1,3	38	21	3,8	134
		Verim	92±1	94±1	77±3	85±2	87±1	93±1	90±1	93±1	61±2	50±3	92±1	75±3
Buzier vd., 2006	Seine Aval AAT, Paris, Fransa	Ham Atıksu				0,6	9	60-65				10-12,5	17,5-20	
		Birincil Atıksu				0,4	3,5-4	35-40				7,5-10	5	
		Üçüncül Arıtım Öncesi Atıksu				0,3	3-4	15-20				7,5-10	5	
		Çıkış Suyu				<0,2	2-3	5-10				11-12,5	<1	
		Verim				≥67	72	88				-4	≥95	-
Carletti vd., 2008	5 AAT, İtalya	Çıkış Suyu	209-557		2-4,9	0,1-0,25	2,70-19,8	5,59-20,8	130-533	0,6-2		1,93-11,7	2,5-16,4	39-223
		Atık Aktif Çamur	11,065-26,447		3-15	1-3	17-560	165-348	4,399-14,511	2-35,9		31-107	46-135	433-2341
		Anaerobik Sindirimden Sonra Çamur	13,360-28,035		12-40,4	1-6,8	30 - 310,2	38,9-317	881 - 5980	3,2-5,1		25,5 - 201,2	3,1-64,5	946-8900
		Verim	44-94		18-60	94	57-72	73-99	78-90	33-92		72-91	53-78	28-93
Chipasa, 2003	Gdansk AAT, Polonya	Ham Atıksu				10-20		~100					~50	450-500
		Verim				10-20		50-60					30-40	80-90
		Birincil ve İkincil Çamur Karışımı				2-12		100-450					35-110	600-1800
		Çürütülmüş Çamur (Susuzlaştırılmamış)				6-22		275-625					65-135	1100-2500

Çizelge 2.5'nin devamı

Referans	Tesis	Örnekleme	Al	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Edokpayi vd., 2015	Thohoyandou AAT, Güney Afrika	Ham Atıksu	1604-3903				30- 476	17-55	744-1374		98- 303		2- 72	71-776
		Izgara ve Kireç İlave Sonrası Atıksu	427 – 6037				18 – 360	25 -125	635 -2160		45 -582		2- 22	
		Birincil Atıksu	367- 3316				33 – 501	31 -61	537 -1134		91 -278		1- 30	
		İkincil Atıksu	627 – 3418				12 - 455	14 -118	522-3401		43- 497		1- 68	
		Çıkış Suyu	501- 2483				30- 329	21 -267	485-1329		42 -899		8- 42	
		Verim	32-74				31	9-36	5-35		32-86		42	
Gulyas vd., 2015	Veszprém AAT, Macaristan	Hamsu				23	185	231	7938		123	123	<1	
		Kum tutucu Sonrası Atıksu				23	174	223	7819		105	120	<1	
		Birincil Atıksu				22	168	214			94	109	<1	
		Çıkış Suyu				21	161	202			62	107	<1	
		GDA				5	160	95			93	48	<1	
		Verim												
		Birincil Çamur				21	565	750			1973	414	<1	
		İkincil Çamur				19	696	1030			2709	633	<1	
Karvelas vd., 2003	Selanik AAT, Yunanistan	Hamsu				3,3±1,1	40±12	79±35				770±200	39±9,4	470±140
		Birincil Atıksu				2,3±0,9	25±12	58±37				600±270	31±12	380±50
		Çıkış Suyu				1,5±0,7	20±4	33±6				430±97	27±3,6	270±53
		Verim				55	50	58				44	31	43
		Birincil Çamur				1 ± 0,4	17 ± 6	100 ± 21				37 ± 12	28 ± 8	350 ± 3
		İkincil Çamur				1± 0.4	32 ± 13	91 ± 17				31 ± 16	16 ± 3	440 ± 59
		Final Çamuru				10 ± 4	370 ± 100	1200 ± 220				300 ± 76	330 ± 84	4500 ± 450
Oliveira vd., 2007	Ribeirão Preto AAT, São Paulo, Brezilya	Hamsu				0,15 ±0,21	6,87 ±3,73	17,31 ±4,93		0,13 0,09	52,53 ±4,06		37,42 ±59,67	79,20 ±41,06
		Çıkış Suyu				0,06 ±0,02	5,74 ±2,83	9,66 ±4,93		0,05 ±0,07	47,04 ±8,14		22,57 ±20,72	43,64 ±13,44
		Verim				60	16,5	44,2		61,5	10,5		39,7	44,9
		Susuzlaştırılmış Çamur			1,14 ±0,08	1,34 ±0,21	195,0 ±16,1	391,7 ±28,7	20537 ±1320	0,31 ±0,18	208,1 ±14,6	239,4 ±25,2	132,1 ±11,6	894,4 ±60,7

Çizelge 2.5'nin devamı

Referans	Tesis	Örnekleme		Al	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Kaynak ve Taşdemir, 2003	Doğu AAT, Bursa, Türkiye	Hamsu		2679 ± 1597	15 ± 32	76 ± 66	3 ± 4	136 ± 76	5943 ± 9887	3114 ± 1319		250 ± 108	852 ± 1693	1065 ± 2038	9018 ± 13704
		Çıkış Suyu		1017 ± 651	14 ± 32	50 ± 52	2 ± 3	75 ±29	4534 ± 5887	1236 ± 586		210 ± 71	620 ± 786	722 ± 1094	6686 ± 9103
		Verim		61,4	24,0	27,1	6,8	65,1	34,7	61,5		18,1	47,2	32,1	39,9
	Batı AAT, Bursa, Türkiye	Hamsu		2771 ±1774	23 ±48	78 ±76	4 ±8	1209 ±1055	4656 ±6330	2486 ±1702		134 ±50	498 ±783	523 ±872	5795 ±6794
		Çıkış Suyu		1069 ±650	17 ±32	57 ±49	3 ±7	423 +219	3042 ±5135	958 ±597		110 ±21	263 ±499	355 ±788	3484 ±4124
		Verim		62,0	9,5	34,2	27,3	45,2	23,7	60,3		15,9	27,2	32,2	25,9
Salihoglu, 2013	Doğu AAT, Bursa, Türkiye	Hamsu		1526		105	18	456	48	1571		114	77	87	405
		Çıkış Suyu		333		44	7	35	13	312		48	44	26	161
		Verim		78		48	46	83	75	79		58	42	61	57
		Susuzlaştırılmış Çamur		6,85		0,85	0,10	0,81	0,63	5,21		0,43	1,65	0,54	3,95
	Batı AAT, Bursa, Türkiye	Hamsu		208,4		78	7	147	51	2478		154	66	49	1266
		Çıkış Suyu		358		28	5	22	12	336		64	33	25	332
		Verim		81		47	36	78	77	84		58	44	51	65
		Susuzlaştırılmış Çamur		7,53		1,04	0,09	0,85	0,50	6,43		0,44	0,84	0,35	4,57
Üstün, 2009	Doğu AAT, Bursa, Türkiye	Hamsu	2002 yılı	849–1916			0–10	742–1171	9–400	994–2259		42–139	0–202	1–47	204–1036
			2007 yılı	603–3753			0–137	174–2120	12–179	1038–3580		97–217	59–202	6–358	303–982
		WSP Çıkış		593 ± 214			4 ±5	423 ± 132	50 ± 77	838 ± 310		112 ± 40	67 ± 40	12 ±9	259 ± 196
		AÇP Çıkış		446 ± 285			6±8	57 ± 40	17 ± 17	338 ± 172		39 ± 24	53 ± 24	30 ± 22	150 ± 99

EHA: Evsel ham atıksu, KHA: Karışık ham atıksu, GDA: Geri devir atıksu , WSP: Atık stabilizasyon havuzu , AÇP: Aktif çamur prosesi, TLA: Tespit limiti altı

Ağır metaller ekosistem üzerindeki toksik etkilerinden dolayı önemli kirleticiler parametrelerinden biridir. Belediye AAT'leri metallerin giderimi için tasarlanmamış olmalarına rağmen bir miktarının atıksudan giderildiği birçok çalışmada rapor edilmiştir. Fakat, atıksudan giderilen bu metaller çoğu zaman katı faza yani çamura geçmektedir. Bu sebeple, arıtma tesisine gelen metallerin önemli bir bölümü arıtma çamurunda bulunmaktadır. ABD Temiz Su Kanunu'nun ve AB Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi'nin uygulanmaya başlanmasıyla nihai çamurun kalitesi de önem kazanmıştır (Cantinho vd., 2016).

- **AB Su Çerçeve Direktifi (2000/60/EC)**

Bu direktifin amacı; tüm suların yani kıta içi yüzey suları, geçiş suları, kıyı suları ve yeraltı sularının korunması için bir çerçeve oluşturmaktır. Su Çerçeve Direktifi ile temelde, tüm suların "iyi su durumuna" ulaştırılması hedeflenmektedir (F. F. Yıldız ve Dişbudak, 2006). Bu direktifin uygulanmaya başlanması ile birlikte en son geliştirilen 2013/39/EU sayılı yönergesi ile AAT'deki metallerin giderimleri konusunda daha sıkı düzenlemeler getirmiştir (Cantinho vd., 2016). Son güncel 2013/39/EU sayılı direktifte, Çevresel Kalite Standartlarını (EC, 2013 Ek-II) karşılayarak yakın gelecekte tüm yeraltı ve yüzey suyu için iyi bir statüye ulaşmak için çevreye verilen emisyonların (öncelikli tehlikeli maddeler) durdurulması ya da azaltılması gereken 45 öncelikli kirleticiler (EC, 2013 Ek-I) listelenmektedir. Bu öncelikli kirleticiler listesinde, Cd ve bileşikleri, Hg ve bileşikleri, Pb ve bileşikleri, Ni ve bileşikleri yer almaktadır. Bu metallerden Cd ve Hg ayrıca öncelikli tehlikeli madde olarak sınıflandırılmıştır. As, Cu, Cr ve Zn gibi diğer metaller de gelecekte potansiyel olarak öncelikli maddeler haline gelebilecek ek maddeler listesinde yer almaktadır. Ek-2'de öncelikli kirleticiler arasında yer alan ağır metallerin Çevre Kalite Standartları (EC, 2013 Ek-II) verilmiştir. Bu yüzey ve yeraltı sularının iyileştirilme politikasının uygulanması için çevreye olan AAT deşarjlarına daha katı kısıtlama kriterleri ve daha fazla kontrollerin yapılmasını gerektirir. Bu sebeple AAT'lerin, membran filtrasyon, iyon değişimi, adsorpsiyon gibi gelişmiş atıksu teknolojilerinin kullanarak yüzey suyu çevresel kalite standartlarına uyum sağlamalıdır (Cantinho vd., 2016).

EC 166/2006 sayılı yönergede yer alan Ek II sütun 1b de kirleticilerin atıksu arıtımında aşılmasını gereken çevreye salınım limitleri verilmiştir. Bu kirleticiler arasında yer alan ağır metaller için belirlenen bu limit değerleri Ek-I'de verilmiştir.

Atıksu arıtımında ortaya çıkan çamur, AAT'ye giren metallerin önemli bir bölümünü içerdiği için çamur bertaraf yöntemleri ve deşarjları son derece önemlidir. AB'de çamur yönetimine ilişkin yer alan en önemli direktifler, 2000/60 / EC sayılı Su Çerçeve Direktifi, 91/271/EEC sayılı Kentsel Atık Su Arıtma Direktifi ve tarımda çamur kullanımı konusunda 86/278/EC sayılı Direktifleridir. Su Çerçeve Direktifi (2000/60/EC), kentsel atıksulardaki kirleticiler deşarjlarının sucül ortama uzun vadeli kademeli olarak azaltılmasını hedeflerken, kentsel atıksu arıtma direktifi (91/271/EEC) sucül ortamının, kentsel atıksu ve bazı endüstriyel deşarjların olumsuz etkilerinden korunmasını amaçlamaktadır (Inglezakis vd., 2014). Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi uygun olduğunda çamurun yeniden kullanımını teşvik eder. Özellikle, direktifin 14. Maddesinde, "Atıksu arıtımından kaynaklanan çamurların uygun olduğu her durumda yeniden kullanılacaktır. Bertaraf etme yöntemlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirilecektir." zorunluluğunu getirmiştir. Ayrıca 86/278/EEC sayılı direktif, tarımsal

arıtma çamurlarının kullanımını teşvik ederek toprak, bitki örtüsü, hayvanlar ve insan üzerindeki zararlı etkilerini önleyecek şekilde kullanımını düzenlemeyi amaçlamaktadır (Tanık vd., 2015). AB bünyesinde bulunan arıtma çamurlarıyla ilgili tüm yönetim stratejileri bu direktifte yer almaktadır. Ayrıca bu direktif, toprak ve çamur içerisinde bulunan ağır metal konsantrasyonları ile toprağa yıllık olarak uygulanabilecek maksimum ağır metal konsantrasyonları ile ilgili kısıtlamalar getirmektedir (İ. Öztürk vd., 2015). Ek-3’de bu direktifte yer alan ağır metallerle ilgili limit değerler mevcuttur.

- **Amerikan Çevre Koruma Ajansı (USEPA)**

Amerikan Çevre Koruma Ajansı (USEPA), Amerika Birleşik Devletleri (ABD) federal hükümetinin insan ve çevre sağlığını korumak amacıyla kurulmuştur. Birincil sorumluluğu, ilgili yönetim kurumlarına danışarak çeşitli çevre yasaları altında ulusal bazda standartların oluşmasını sağlamak ve uygulamaktır. Ayrıca, USEPA su politikalarına göre içme, yeraltı ve yerüstü sularını koruması ve iyileştirmesi amaçlanmaktadır. Bunların yanı sıra su kirliliğini önleme, kuraklık, AAT’lerden elde edilen arıtma çamurunun yüzey ve yeraltı sularına olan etkileri, sel - taşkın suları, bataklık ve diğer sulak alanlardaki sorunlar da US EPA’nın yetkileri arasında yer almaktadır (Cebe, 2016).

Su kirliliğine ilişkin temel federal düzenleme olan Temiz Su Kanunu (Clean Water Act), yüzeysel suların kalite standartlarını ve sulara yapılacak deşarjları düzenler (Cebe, 2016). Bu kanun amacı, ulusal suların fiziksel, kimyasal ve biyolojik bütünlüğünü yeniden sağlamak ve sürdürmektir. Bu sebeple iki çeşit kirlilik kontrolü standardı getirmiştir. Bu standartlardan ilki deşarj edilen kirleticinin miktarına ilişkin standartlar diğeri ise ortamdaki kirleticili konsantrasyonuna sınırlama getiren su kalite standartlarıdır (Perçin, 2014).

USEPA, atıksuların arıtılması ve deşarjı ile sel – taşkın sularını kontrol etme ve önleme konularında belediye, eyalet ve federal otoritelere rehberlik yapmak için Ulusal Kirleticili Deşarj Önleme Giderme Sistemi (National Pollutant Discharge Elimination System) kullanılmaktadır. Atıksu Arıtımı ve Deşarjı Temiz Su Kanunun hükümlerine göre yapılarak bununla ilgili tüm tesislerin izinleri USEPA tarafından verilir (Cebe, 2016). Ulusal Kirleticili Deşarj Giderme Sisteminde, Temiz Su Kanunun 40 nolu başlığının altındaki Ek D Tablo III’de listelenen zehirli kirleticiler (metaller ve siyanür) tablosunda Antimon, Arsenik, Berilyum, Kadmiyum, Krom, Bakır, Kurşun, Civa, Nikel, Selenyum, Gümüş, Talyum, Çinko ve Siyanür metalleri yer almaktadır.

Ayrıca USEPA, stabilize arıtma çamurlarının tarım alanında uygulanmasını düzenlemek üzere Bölüm 503 Arıtma Çamurunun Kullanım ve Bertaraf Standartları (Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge) yönetmeliğini çıkartmıştır. Bu yönetmelikte yer alan limit değerler Ek-4’ de verilmiştir.

2.4.1. Ulusal bazdaki yasal düzenlemeler

Ülkemizde çevreye dair mevzuat hazırlamak, uygulamaları izlemek ve denetlemek, çevrenin korunması, iyileştirilmesi ile çevre kirliliğinin önlemesine yönelik standartlar geliştirme, denetim ve faaliyetlerde bulunmak gibi görevler Çevre ve Şehircilik Bakanlığı bünyesine yer almaktadır. Çevrenin korunmasına yönelik alınacak

tedbirler ve uygulamalarına ilişkin genel ilkeler 2872 sayılı Çevre Kanunun maddelerinde yer almaktadır. Bu kanunun amacı, çevrenin, sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda korunmasını sağlamaktır (Cebe, 2016; Çevre Kanunu, 1983). Ayrıca 2006 yılında önemli değişikliklere uğrayan bu kanun, özellikle su kaynaklarını çevrenin en temel öğelerinden biri olarak görmekle birlikte su kaynaklarının korunmasına ilişkin düzenlemeler içermektedir (Perçin, 2014).

- **Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (2004)**

Bu yönetmelik, ülkenin yeraltı ve yerüstü su kaynakları potansiyelinin korunması ve en iyi bir biçimde kullanımının sağlanması için, su kirlenmesinin önlenmesini sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde gerçekleştirmek üzere gerekli olan hukuki ve teknik esasları belirlemeyi amaçlar. Ayrıca, su ortamlarının kalite sınıflandırmaları ve kullanım amaçlarını, su kalitesinin korunmasına ilişkin planlama esasları ve yasaklarını, atıksuların boşaltım ilkelerini ve boşaltım izni esaslarını, atıksu altyapı tesisleri ile ilgili esasları ve su kirliliğinin önlenmesi amacıyla yapılacak izleme ve denetleme usul ve esaslarını kapsamaktadır. Bu yönetmelik kapsamında atık suların arıtılmadan alıcı ortama verilmesi yasak olup, arıtılmış atık suyun verileceği alıcı ortam için belirlenmiş kalite standartlarının olumsuz yönde etkilenmemesi esastır. Bu yönetmelikte yer alan su kalite kriterleri, atıksuların alıcı ve kanalizasyon sistemine olan deşarj kriterleri Ek-5, Ek-6 ve EK-7’de verilmiştir.

- **Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği (2005)**

Bu yönetmeliğin amacı, su ve çevresindeki tehlikeli maddelerden kaynaklı kirliliğin tespiti, önlenmesi ve kademeli olarak azaltılmasıdır. Tehlikeli maddeler çok tehlikeli ve daha az tehlikeli olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır ve **Hg** ve **Cd** çok tehlikeli maddeler listesinde, **Ni, Pb, Cr, Zn, As, Cu, Al, Sn, B, Fe, V, Br, Ba, Be, Co** metalleri daha az tehlikeli maddeler listesinde yer almaktadır (Ek-8). Ayrıca, bu yönetmelik kapsamında tehlikeli madde içeren atıksuların alıcı ortama doğrudan deşarjı yasaktır ve tehlikeli madde içeren atıksuların alıcı ortama veya kanalizasyona deşarjında; ilgili idareden izin alınması ve belirlenen limit değerleri aşmaması gerekir. Bu yönetmeliğin Ek-1’inde yer alan çok tehlikeli maddeleri içeren sektörlerin sağlaması gereken deşarj standartları (Ek-9 ve Ek-10) bu yönetmelikte verilmiş olup yönetmeliğin Ek-2’sinde yer alan daha az tehlikeli maddeleri içeren sektörlerin sağlaması gereken deşarj limitleri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde (SKKY) yer almaktadır. Bu Yönetmelik ve SKKY ile deşarj limit değerleri belirlenmemiş olan ve bu Yönetmeliğin Ek-2’sinde yer alan tehlikeli maddelerin deşarj izinleri alıcı ortam kalite kriterlerine dayalı olarak yani envanter çalışması ile ilgili idare/idarelerce belirlenecektir.

- **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği**

Bu yönetmelik, kentsel atıksuların toplanması, arıtılması ve deşarjı ile belirli endüstriyel sektörlerden kaynaklanan atıksu deşarjının olumsuz etkilerine karşı çevreyi korumayı amaçlar. Ayrıca atıksu deşarjlarının izlenmesi, raporlanması ve denetlenmesi ile ilgili teknik ve idari esasları kapsar. Bu yönetmelik kapsamında personel sağlığının korunması, kanalizasyon sistemleri, AAT’ler ve bunlarla ilgili ekipmanlarının zarar görmesinin önlenmesi, AAT’lerin işleyişine ve arıtma çamurunun arıtılmasına engel

olmaması, arıtma tesislerinden yapılan deşarjların çevre üzerinde olumsuz etkilerinin olmaması ve arıtma çamurunun çevresel bakımdan kabul edilebilir ve güvenli bertarafının sağlanması için endüstriyel atıksuların kanalizasyon sistemlerine ve Kentsel AAT'lere boşaltılmadan önce ön arıtmaya tabi tutulur. Deşarj standartları SKKY'de verilen limit değerlere göre uygulanır. Ayrıca bu yönetmeliğe göre uygun şartlarda arıtılmış atıksu ve çıkan arıtma çamuru yeniden kullanılabilir ve arıtma çamurlarının toprakta kullanımı ve/veya bertarafının, Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde belirlenen standartlara ve yöntemlere uygun olarak yapılması esastır.

- **Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik**

Bu yönetmelik, Evsel ve Kentsel AAT'lerden çıkan arıtma çamurlarının çevreye ve canlılara zarar vermemesi için toprakta kontrollü kullanımına ilişkin idari ve teknik esasları kapsar. Bu sebeple, uygulanacak arıtma çamuru ve çamurun uygulanacağı tarım arazisi toprağındaki ağır metal konsantrasyonları için limit değerler bu yönetmelikte belirlenmiştir, bu limit değerler Ek-11' de verilmiştir. Topraktaki ağır metal konsantrasyonlarından herhangi birinin sınır değerlerinin aşılması durumunda, stabilize arıtma çamurunun toprakta kullanılması yasaktır. Arıtma çamurları eğer toprakta kullanılmayacaksa Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliğine göre katı atık depolama sahalarında bertaraf edilmesi gerekmektedir. Tehlikeli atık sınıfına giren arıtma çamurları ise Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinin hükümlerine göre bertaraf edilmesi gerekmektedir.

- **Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği**

Bu tebliğ, 2872 sayılı Çevre Kanunu ile mezkûr kanunda ek ve değişiklik yapan kanun hükümlerine uygun olarak hazırlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ve Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'ne dayanılarak hazırlanmıştır. Yerleşim birimlerinden kaynaklı atıksuların arıtılmasında AAT'lerin teknoloji seçimi, tasarım kriterleri, arıtılmış atıksuların dezenfeksiyonu, yeniden kullanımı, derin deniz deşarjı ile arıtma çamurunun bertarafı için kullanılacak temel teknik uygulama esaslarını içerir. Ayrıca, atıksuyun sulama suyu olarak kullanımını için Tebliğde izin verilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları Ek-13' de verilmiştir. Sanayi tesislerinden kaynaklanan atıksuların Tebliğdeki Tablo E7.1, Tablo E7.2 ve Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği Ek-III'de bulunan sektörlerin dışındakiler Ek-15'de belirtilen parametrelerin temelinde yapılacak analiz sonuçlarının değerlendirilmesine göre sulama suyu olarak kullanılmasına izin verilir. Tebliğde yer alan geri kazanılmış atıksulardaki tahmini eser madde konsantrasyonları Ek-14' de verilmiştir.

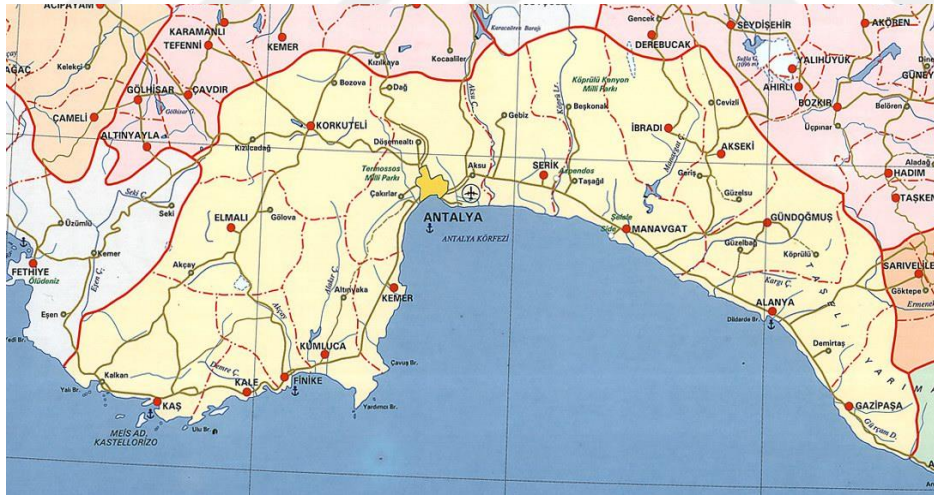
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çalışma Alanı

3.1.1. Antalya ili genel özellikleri

Antalya, kara sınırını Toros dağlarının oluşturduğu Türkiye'nin güneyinde yer alan Akdeniz bölgesinin en önemli kentlerinden biridir. Batısında Muğla, doğusunda Karaman, Mersin illeri, kuzeyinde Isparta ve Burdur, Konya vardır ve güneyi Akdeniz ile çevrelenmektedir. İl'in üç tarafı yüksek dağlarla çevrilidir ve en yüksek dağı Akdağ ve Beydağ'ı olup bu dağların tümüne güney Toroslar denilmektedir. İl sınırları içerisinde Dimçay, Alara Çayı, Köprüçay, Devrense Çayı, Manavgat Irmağı ve Eşençay bulunmaktadır. Yörenin bitki örtüsü makidir ve bu türler arasında mersin, kocayemiş, ladin ve katran ardıcı sayılabilir. Şehir merkezinin denize kıyısı bulunan bu şehrin sahil bölgesinde tipik Akdeniz iklimi (azları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı) görülürken iç bölgelerinde ise Akdeniz iklimi ile iç Anadolu iklimi arasında geçiş olan kara iklimi hakimdir (Anonim 2). Antalya ilinin coğrafi haritası Şekil 3.1'de verilmiştir.

Antalya'da 2017 nüfus sayımlarına göre 2. 364.396 kişi yaşamaktadır. Şehrin en önemli ekonomi kaynakları turizm, ticaret ve tarımdır. Deniz turizmi açısından Türkiye'nin en büyük potansiyeline sahip şehridir fakat sanayi sektöründe Türkiye ortalamasının altında kalmaktadır. Başlıca sanayi tesisleri; Elektrometalürji Sanayi T.A.Ş.'nin Ferrokrom ve Karpit Fabrikası, Pamuklu Dokuma Fabrikası, pil, bahçe traktörü, kiremit, tuğla, mobilya, un, çırçır, konserve, bisküvi, yağ, meyve ve sebze fabrika ve atölyeleridir (Anonim 3).



Şekil 3.1. Antalya ili coğrafi haritası (Anonim 4)

3.1.2. Hurma Atıksu Arıtma Tesisi

Hurma AAT, Antalya-Kemer karayolunun 16. km'sinde, Tünektepe yolunda kıyından 2600 m uzaklıkta kurulmuştur. Antalya Su ve Atıksu İdaresi (ASAT) Genel Müdürlüğü tarafından 30 Eylül 1996 tarihinde ön arıtma tesisinin temeli atılmış ve 17 Şubat 1999 yılında yapımı tamamlanmıştır. Ön arıtmada organik madde arıtımı yapılmadığı için denize verilen çıkış suyunun kirliliğe yaratmaması için biyolojik atıksu

arıtma ünitesinin de yapılması kararlaştırılmıştır. İlk kademesi 250.000 kişiye hizmet verecek şekilde kapasite planı yapılmış ve 17 Nisan 2001 tarihinde temeli atılmış ve 29 Aralık 2001 tarihinde de hizmette açılmıştır. İkinci kademesinin temeli 12.07.2004 tarihinde atılıp kapasite artışı tamamlandıktan sonra Ocak 2005 de işletmeye başlanmış ve 500.000 kişiye hizmet verecek kapasiteye ulaşmıştır. 2009 yılında da üçüncü kademe inşaatı başlayıp Nisan 2011 de işletmeye alınmıştır. Böylece şu anda 210.000 m³/gün atıksu arıtma kapasiteli tesis 1.400.000 nüfusa hizmet vermektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de tesisin yerleşim yeri ve planı verilmiştir.

Bu AAT’de atıksudan Karbon (C) – Azot (N) - Fosfor (P) giderimi uzun havalandırmalı aktif çamur sistemine (Bardenpho Prosesi) göre yapılmaktadır. %98 verimle arıtılmış su toplam 5 km uzunluğundaki deşarj hattı ile 50 metre derinliğinde denize verilmektedir. Çizelge 3.1’de de görüldüğü üzere deşarj limitlerine göre deniz deşarjı yapılmaktadır.



Şekil 3.2. Hurma AAT yerleşim yeri (Anonim 5)



Şekil 3.3. Hurma AAT genel yerleşim planı (Anonim 5)

Çizelge 3.1. Hurma AAT giriş ve çıkış suyu parametre değerleri(Anonim 5)

Parametreler	Giriş atıksu değerleri	Standart deşarj limitleri	Gerçekleşen deşarj limitleri
KOİ (mg/l)	700	125	35-45
BOİ ₅ (mg/l)	400	25	5-15
AKM (mg/l)	500	35	15-25
TN (mg/l)	60	10	4-7
TP (mg/l)	12	2	1-2
pH	6-9	6-9	6-8

Tesisin ön arıtma üniteleri; kaba ve ince ızgara, havalandırmalı kum ve yağ tutucu havuzlarından ve ön çöktürme havuzundan oluşmaktadır. Biyolojik arıtma üniteleri; bio-fosfor (anaerobik) havuzları, havalandırma havuzları ve son çöktürme havuzlarından oluşmaktadır. Çamur üniteleri ise mekanik yoğunlaştırma, anaerobik çamur çürütme ve çamur susuzlaştırmadan oluşmaktadır. Ayrıca çamur susuzlaştırma ünitesinden çıkan çamur kekleri arıtma çamuru termal kurutma ve ko-jenerasyon ünitesine gönderilmektedir.

Antalya'nın batı bölgesindeki atıksuların arıtımını yapan Hurma AAT'sine atıksular 2000 mm çapındaki kolektör hattı ile gelmektedir. Tesise gelen atıksular öncelikle 50 mm'lik çubuk aralığına sahip kaba ızgaralardan geçirilmektedir. Atıksu içerisindeki büyük boyutlu (taş, tahta, plastik parçaları vb.) maddeler ızgara tırmıkları ile atıksudan mekanik işlemlerle ayrılarak katı atık depolama sahasına gönderilmek üzere konteynerlere boşaltılırlar. Kaba ızgaradan geçen atıksular kapasitesi 1325 m³/saat olan pompalar ile terfi edilerek orta ve küçük boyutlu partiküllerin atıksudan ayrılması için önce çubuk aralığı 30 mm daha sonra 10 mm olan dörder adet ince ızgaradan geçirilir. Buradan toplanan orta ve küçük ölçekli partiküler maddeler de yine katı atık depolama sahasına gönderilmek üzere konteynerlerde toplanırlar.

Izgaralardan geçen atıksular, 5 m genişliğinde, 45 m boyunda ve 6,3 m derinliğindeki 6 tane havalandırmalı kum ve yağ tutucu havuzlarına kanallar vasıtasıyla iletilir. Her biri 540 Nm³/saat olan 6 adet hava blowerla havuz tabanlarına döşenen boru hatları için hava temini sağlanır. Havuzlara su akışına dikey yönde hava verilerek kendi ağırlığı ile dibe çöken kum ve diğer katı maddelerin dipte hareketi sağlanır bu sırada kendi ağırlığı ile çökelemeyen yağ ve organik maddelerin yüzeyde ve askıda kalması sağlanır. Havuz dibinde çökelen kum ve ağır partiküller yine havuz üzerinde çalışan gezer köprülere monte edilmiş olan 36 m³/saat kapasiteli kum pompaları vasıtasıyla çekilerek havuz kenarında yer alan kum kanallarına aktarılırlar. Yüzeyde oluşan köpük ve yağlar 40 m³/saat kapasiteli pompalar vasıtasıyla ızgaralara gönderilir ve orada susuzlaştırıldıktan sonra konteynerlere alınırlar. Kumlar kanala alınarak ızgaralardan geçirilip sonra konteynerlere iletilir ve katı atık depolama sahasına gönderilirler.

Ön arıtmadan çıkan atıksu biyolojik fosfor gideriminin yapılması için terfi merkezinden dalgıç pompalar ile anaerobik reaktöre gönderilmektedir. Kütle dengesinin korunması için geri devir yapılmaktadır. Anaerobik ortamı oluşturmak için su 1,4 saat hava vermeden bekletilir ve bu anaerobik ortamda bulunan mikroorganizmalarda fosforu bünyelerine alırlar (Anonim 5). Hurma atıksu arıtma tesisinde, biyolojik fosfor gideriminin yanında gerekli görüldüğü durumlarda havalandırma havuzu çıkış toplama yapısında FeCl_3 (günlük ortalama 750 L) ilavesi yapıldığı belirtilmiştir (Doğan, 2010).

Bio-fosfor havuzlarından çıkan atıksular havalandırma havuzlarına aktarılır. Bardenpho prosesinde denitrifikasyonun gerçekleşebilmesi için karbon kaynağı olarak hem atıksudaki karbon hem de içsel solunum hidrolizi sonucu oluşan karbon kullanılır. Karbon oksidasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon için havalandırma havuzunda sırasıyla anoksik-oksik-anoksik-oksik ayrı bölümleri kullanılır. Atıksu öncelikle birinci anoksik reaktörüne girerek denitrifikasyon gerçekleşir. Bu reaktöre aynı zamanda karbon oksidasyonu-nitrifikasyon reaktörü çıkış suyu da geri döndürülerek verilir. Atıksudaki karbon, geri döndürülen sudaki nitratı denitrifiye etmek için kullanılır. Atıksudaki amonyum birinci anoksik ortama girdikten sonra hiçbir değişime uğramadan birinci oksik tanka gelir. Bu tanktan çıkan nitriye olmuş atıksu, ikinci anoksik reaktöre girer. Bu ikinci anoksik reaktörde içsel solunum ile karbon sağlanıp denitrifikasyon gerçekleştirilir. İkinci oksik reaktör nispeten küçük olup, azot gazının ortamdaki uzaklaştırılması için kullanılır. İkinci anoksik reaktörde son havalandırmada nitriye olmuş çamurdan ayrılan amonyakın denitrifikasyonu gerçekleştirilir (Anonim 6).

Nitrifikasyon (Oksijenli): Amonyum azotu => Nitrit => Nitrat

Denitrifikasyon (Anoksik): Nitrat => Nitrat Azotu => Azot Gazı

Havalandırma havuzundan çıkan aktif çamur-su karışımı dairesel son çöktürme tankına gelir ve burada yerçekimi etkisiyle çöken çamur geri devir oranına göre bir kısmı pompa ile çekilir. Çöktürme havuzu yüzeyinde biriken köpükler de yüzeysel sıyrıcılarla toplanarak fazla çamur pompa istasyonuna gönderilir ve arıtılmış su savaklar yardımıyla deşarj tankına gönderilir.

Ön çöktürme ve son çöktürme havuzlarından alınan çamur, çamur karıştırma ve yoğunlaştırma tanklarına aktarılır ve havalandırma işlemine tabi tutularak çamurun stabil kalması sağlanır. Yoğun çamur (%4-5 KM) 30 m³/saat kapasiteli 6 adet pompa ile anaerobik çamur çürütme (Dıgester) tanklarına iletilir.

Çürütme prosesi anaerobik koşullarda ve mezofilik şartlarda gerçekleştirilmektedir. Bu mezofilik üç tür bakteri grubu (Fermantasyon bakterileri, asit bakterileri, metan bakterileri) sayesinde çamur çürütme işlemi yapılır. Bu da 35°C de oksijensiz ortamda organik maddenin ayrıştırılmasıyla gerçekleşir. Çürütme işlemi sonucunda; kısmen kokusuz, susuzlaştırılabilir, insan sağlığı için zararsız ve daha düşük hacimle arıtma çamuru elde edilmektedir.

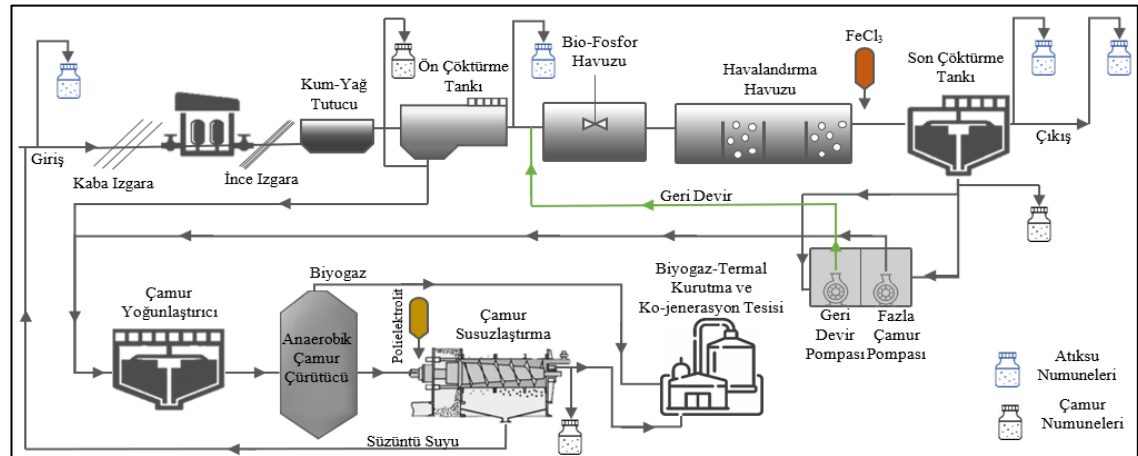
Çürütme tanklarından çıkan %3 yoğunluğundaki çamur cazibe ile çamur karıştırma ünitesine gönderilir ve buradan alınan çamur susuzlaştırma işlemi için dekantörlere gönderilir. %3 KM yoğunluğundaki çamura, polielektrolit çözeltisi eklenir ve 60 m³/saat kapasiteli dekantörlerde %25 KM içeriğinde olacak şekilde susuzlaştırılır.

Elde edilen çamur keki Arıtma Çamuru Termal Kurutma ve Ko-jenerasyon tesisine gönderilir (Anonim 5).

3.2. Numunelerin Toplanması

Antalya ilinin en büyük arıtma tesisi olan Hurma AAT'nin öncelikle giderim verimini incelemek için arıtma tesisi giriş ve çıkışından atıksu numunesi alınmıştır. Ayrıca ağır metallerin akıbetini incelemek için ara ünite olan ön çöktürme ve son çöktürme ünitelerinden de atıksu numuneleri toplanmıştır. Arıtma tesisindeki ağır metal akıbetini daha kapsamlı incelemek için aynı ara ünite olan ön ve son çöktürme ünitelerinden ve susuzlaştırılmış çamur ünitesinden de çamur numuneleri alınmıştır. Numune alma noktaları ve tesisin akım şeması Şekil 3.4'de verilmiştir. İzleme çalışmaları ilgili noktalardan 1 yıl boyunca alınan numunelerle sürdürülmüştür. Mevsimsel değişimleri gözlemek için örnekleme frekansı 3 ay olarak belirlenmiş ve Haziran, Eylül, Ocak ve Nisan aylarında yağışın olmadığı 3 ardışık gün örnekler toplanmıştır.

Tesisin giriş ve çıkış atıksu numuneleri 24 saatlik kompozit numune olarak, ara ünitelerden alınan atıksu ve çamur numuneleri anlık (grab) numune olarak alınmıştır. Numune kapları olarak polietilen şişeler kullanılmış ve bu kaplar fosfat içermeyen, noniyonik deterjan (Extran® AP22 liquid), nitrik asit (HNO_3) ve iyonize su ile temizlenerek kullanılmıştır. Numuneler alındıktan hemen sonra atıksu numuneleri konsantre HNO_3 ile asitlendirilip $\text{pH} < 2$ ye düşürülerek korumaya alınmıştır. Sadece çözülmüş metal tayini yapılacak numuneler $0,45 \mu\text{m}$ 'lik filtreden geçirildikten sonra asitlendirilmiştir. Asitlendirilen numuneler buharlaşma nedeniyle oluşabilecek hacim değişimini önlemek için soğuk zincirle laboratuvara taşınıp, ağır metal analizi için yaklaşık 4°C deki buzdolabında saklanmıştır.



Not: FeCl_3 ilavesi gerektiği zamanlarda yapılmaktadır.

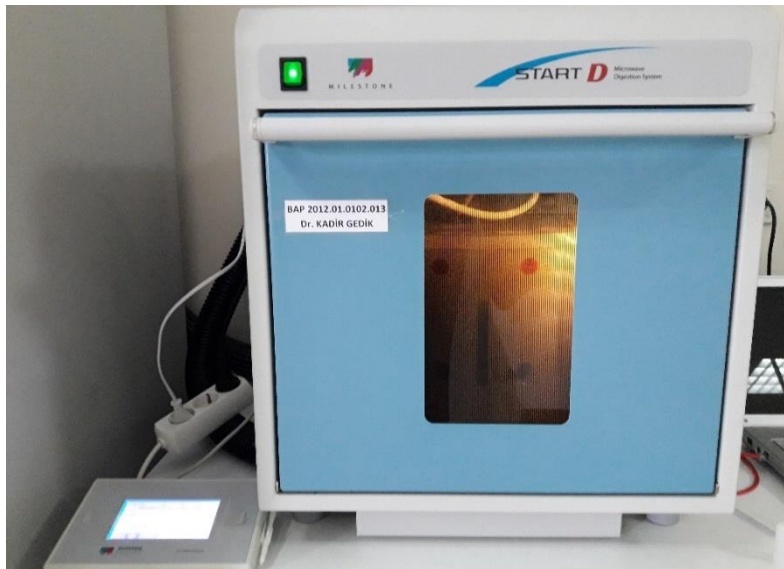
Şekil 3.4. Hurma AAT akım şeması ve numune alma noktaları

3.3. Numunelerin Ağır Metal Ölçüm Ön Hazırlık İşlemleri

Hurma AAT'deki sıvı ve katı fazdaki ağır metal içeriklerinin izlenmesini gerçekleştirerek mevcut arıtma ünitelerinin ağır metal giderim performanslarını ve ağır metallerin AAT'deki davranışlarını değerlendirerek ulusal veri tabanına katkı sağlamak amacıyla 2013/39/EU direktifteki öncelikli kirleticiler listesinde bulunan Cd, Hg, Pb, Ni

ve önümüzdeki dönemlerde bu listeye aday gösterilen Cu, Zn, As, Cr analizleri yapılmıştır. Partikül veya organik materyal içeren numuneler spektroskopik analizden önce ön işleme tabi tutulmuş ve toplam metal analizinden önce de çürütme işlemi yapılmıştır. Atıksu numuneleri için bu analiz öncesi çürütme işlemi, Standart Metot 3030 K. Mikrodalga Destekli Çürütme (Microwave-Assisted Digestion) yöntemine göre, çamur numuneleri için yapılacak çürütme işlemi, EPA Metot 3051A mikrodalga destekli çürütme (Microwave Assisted Acid Digestion Sediments, Sludges, Soils, and Oils) yöntemine göre yapılmıştır.

Asitlendirilerek saklanan atıksu numunelerinde, Standart Metot 3030 K. Mikrodalga Destekli Çürütme (Microwave-Assisted Digestion) yöntemine göre ilk olarak 45 ml iyice karıştırılmış sıvı numune, tartılmış digestion tüpüne koyulmuştur. Daha sonra içine 5 ml HNO₃ pipetleyerek daha önceden tartılmış digestion tüpünün kapağı ile sıkıştırılarak kapatılmıştır. Tekrar tartımları yapıldıktan sonra örnekler döner piramide yerleştirilmiştir. Önce 10 dak. 160 derecede ısıtılmış ve daha sonra 10 dak. sıcaklık 165 dereceye çıkartılmıştır. Tüpler çıkarılmadan önce 5 dak. cihazda soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Tüpler tartılıp %10'dan fazla azalma olmadıysa kapak açıldıktan sonra çürütülmüş numuneler santrifüjlenip falcon tüplere aktarılmıştır. Atıksudaki çözünmüş metaller için ise numuneler ilk olarak filtreden geçirilmiştir. Daha sonra filtreden geçen kısmı asitlendirilerek falcon tüplere aktarılmıştır. İlgili metal analizleri ICP-MS cihazı (Agilent 7700 series ICP-MS) ile analiz için Bursa Teknik Üniversitesi'ne gönderilmiştir. Tespit limitleri Cd için 0,02 ppb, Hg için 0,2 ppb, Pb için 0,015 ppb, Cr için 0,04 ppb, Ni için 0,7 ppb, Cu için 0,004 ppb, Zn 0,2 ppb ve As için 0,02 ppb'dir. Askıda ağır metallerin miktarı, toplam ağır metal ile çözünmüş ağır metal arasındaki fark ile hesaplanmıştır. Ayrıca, atıksu numunelerinde Standart Metot 3030 K'da belirtildiği gibi 5 ml asidin 45 ml numuneye eklenmesinden kaynaklanan seyreltmeyi hesaba katmak için sonuçları 50/45 yani 1.11 ile çarparak dilisyon düzeltmeleri yapılmıştır.



Şekil 3.5. Mikrodalga çürütme sistemi (Milestone MA079 Microwave Digestion System)

Çamurun numuneleri, EPA Metot 3051A mikrodalga destekli çürütme (Microwave Assisted Acid Digestion Sediments, Sludges, Soils, and Oils) yöntemine göre ilk olarak 0,5 gr iyi karıştırılmış numune tartılmış digestion tüpüne aktarılmıştır. Daha sonra içine 10 ml HNO₃ pipetleyerek daha önceden tartılmış digestion tüpünün kapağı ile sıkıştırılarak kapatılmıştır. Ön parçalama işlemini takiben bu metotla tanımlanan parçalama işlemini mikrodalgada yürütmek için örnekler döner piramide yerleştirilmiştir. Önce örnekler 5,5 dak. 175 derecede ve daha sonra 10 dak. 175 derecede ısıtılmıştır. Tüpler çıkarılmadan önce 5 dak. soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Çürütülmüş numuneler santrifüjlenip falcon tüplere aktarılmıştır. Aynı şekilde ICP-MS ile analiz için Bursa Teknik Üniversitesi'ne gönderilmiştir.



Şekil 3.6. (a) Digestion tüplerindeki numuneler (b) Numunelere asit ekleme

Çamur numunelerinin mg/kg ve mg/kg kuru ağırlığına dönüşümü EPA 3051A'da yer alan aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{mg/kg} = \frac{(C)(V)(D)}{W}; \text{mg/kg KM} = \frac{(C)(V)(D)}{(W)(S)}$$

C = Metal konsantrasyonu

D = Seyreltme faktörü

S = Numune için kuru ağırlık oranı

V = Numune hacmi

W = Çürütülen numunenin ağırlığı

Numuneni kuru ağırlık oranını (S) EPA 3051A'da yer alan aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S = \frac{W_2 - W_3}{W_1 - W_3} (g/g)$$

W₁: Kurutma işlemi öncesi numune + kap ağırlığı, g

W₂: Kurutma işlemi sonrası numune + kap ağırlığı, g

W₃: Boş kap ağırlığı, g

Kurutma işlemi Standart Metod 2540 B'e göre 103-105°C'de etüvde gerçekleştirilmiştir.

3.4. Numunelerde Temel Parametrelerin Analizleri

Ağır metal analizlerinin yanı sıra tesisin çalışma veriminin tespiti için numuneler asitlendirilmeden önce bir kısmı ayrılarak standart metotlara göre pH, KOİ ve AKM analizleri de yapılmıştır. KOİ analizi için HACH LCK 314 hazır kitleri kullanılmıştır. KOİ analizleri ISO 6060-1989, DIN 38409-H41-H44 standartlarına göre 15-150 mg/l O₂ ölçü aralığında dikromat metoduna göre yapılmıştır. Hazır kitler bir kez ters düz edikten sonra iyice karıştırılmış numuneden 2 ml eklenerek 2 saat boyunca 148°C'de termostatta (HACH LT 200) ısıtılmıştır. Sıcak kitler iki kere ters düz yapıldıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan kitlerin dışı temizlenerek ölçümleri yapılmıştır. Giriş numunelerindeki KOİ, ölçüm aralığının üzerinde olduğu için seyreltme yapılarak analizleri gerçekleştirilerek daha sonra seyreltme oranına göre hesabı yapılmıştır.

$$\text{Seyreltme oranı: } \frac{\text{Numune Hacmi}}{\text{Toplam Hacim}}$$

$$\text{KOİ (mg/l)} = \text{Seyreltilmiş KOİ sonucu} * \frac{1}{\text{Seyreltme Oranı}}$$

AKM analizleri Standart Metod 2540-D yöntemine göre yapılmıştır. 0.45 µm'lik filtre kağıtları 1 saat boyunca 105°C etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan filtre kağıtları desikatörde soğumaya bırakılıp daha sonra tartımları yapılmıştır. Karıştırılmış numuneler tartılan filtre kağıtlarından süzildükten sonra tekrar 1 saat boyunca 105°C etüvde bekletilip sonrasında desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan filtre kağıtları tartılarak aşağıdaki formüle göre AKM değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{AKM (mg/l)} = \frac{(A-B)*1000}{\text{Numune Hacmi, ml}}$$

A: Kurutulmuş numune + filtre ağırlığı, mg; B: Filtre ağırlığı, mg.

pH analizleri de HANNA HI 2211 marka pH cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Hurma AAT'nin Genel Arıtım Parametreleri

Çizelge 4.1'de tesisin verimli çalışıp çalışmadığını belirlemek için yapılan KOİ, AKM ve pH analizleri mevcuttur. Bu sonuçlara göre tesisin pH değerlerinin Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğindeki Tablo 21'de yer alan standart limit değer (pH: 6-9) aralığında olduğu gözlenmiştir. Metcalf & Eddy. (2000 ve 2004)'de ham evsel atıksuyun tipik özellikleri verilmiştir. Bu değerlere göre tesise gelen atıksu KOİ sonuçlarında ilkbahar, sonbahar ve kış döneminde kuvvetli, yaz döneminde orta su özelliğindedir. AKM sonuçlarına göre yaz ve kış döneminde kuvvetli, ilkbahar döneminde orta, sonbahar döneminde ise zayıf su özelliğindedir. Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (2006)'ndeki EK-IV Tablo 1'de yer alan deşarj limitlerine göre AKM ve KOİ konsantrasyon sonuçlarına baktığımızda sonuçların limit değerlerinin (KOİ için 125 mg/L, AKM için 35 mg/l) altında olduğu görülmektedir. Bu durum tesisin numune alma günlerinde düzgün çalıştığını göstermektedir.

Çizelge 4.1. Hurma AAT'nin genel arıtım parametreleri

Numune Alma Zamanı	Numune Alma noktası	KOİ (mg/L)	AKM (mg/L)	pH
İlkbahar	Giriş	1359,33	236,76	7,94
	Çıkış	119,83	12,160	7,73
Yaz	Giriş	710	355	7,72
	Çıkış	87,5	12,5	7,57
Sonbahar	Giriş	1322	188,3	7,63
	Çıkış	98,63	9,67	7,80
Kış	Giriş	1300	761,67	6,74
	Çıkış	89,97	23,67	6,67

4.2. Hurma AAT'deki Arıtma Aşamalarındaki Ağır Metal Konsantrasyonları ve Giderim Verimi

Antalya ilinin Konyaaltı, Döşemealtı ve Kepez belediyesi sınırları içindeki evsel atıksular Hurma AAT'de arıtılmaktadır. Ayrıca, Antalya Organize Sanayi Bölgesindeki (OSB) işletmelerin atıksuları OSB'de yer alan arıtma tesisinde arıtıldıktan sonra Hurma AAT'ye gönderilmektedir (Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2018).

Ağır metallerin bir yıl içerisindeki durumunu incelemek için tesisten mevsimsel (yaz, sonbahar, kış, ilkbahar) numuneler alınarak analizleri yapılmıştır. Her mevsim dönemi için 3 gün numune alınmıştır. Şekil 4.1 - Şekil 4.7'de Yaz döneminde alınan

numunelerin ortalamasına göre arıtma aşamalarındaki ağır metallerin sıvı ve katı fazdaki konsantrasyonları verilmiştir. Bunlara ek olarak, sıvı fazdaki ağır metallerin partikül ve çözünmüş faz dağılımları da mevcuttur. Aynı şekilde sonbahar dönemi verileri Şekil 4.9-Şekil 4.16'da kış dönemi verileri Şekil 4.18- Şekil 4.25 ve ilkbahar dönemi verileri Şekil 4.27- Şekil 4.34'de verilmiştir.

4.2.1. Yaz dönemi ağır metal konsantrasyonları

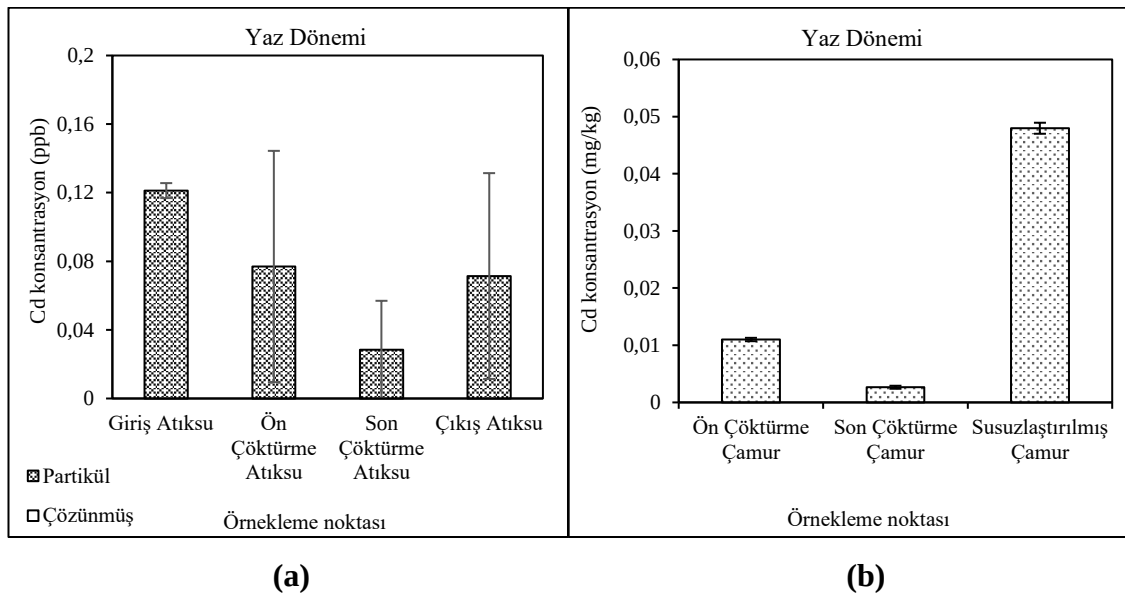
Avrupa Birliği 2013/39/EU sayılı direktifte 45 öncelikli kirletici listelenmektedir. Bu öncelikli kirleticiler listesinde, Cd ve bileşikleri, Hg ve bileşikleri, Pb ve bileşikleri, Ni ve bileşikleri yer almaktadır. Bu metallerden Cd ve Hg ayrıca öncelikli tehlikeli madde olarak sınıflandırılmıştır. As, Cu, Cr ve Zn gibi diğer metaller de gelecekte potansiyel olarak öncelikli maddeler haline gelebilecek ek maddeler listesinde yer almaktadır.

Yaz döneminde tesise gelen en yüksek ağır metaller Zn ($25,46 \pm 11,38$ ppb), Pb ($8,60 \pm 0,15$ ppb), Cr ($2,85 \pm 2,39$ ppb) ve Cu ($2,08 \pm 0,79$ ppb) olurken, en düşük ağır metaller Cd ($0,12 \pm 0,004$ ppb), As ($0,07 \pm 0,07$ ppb), Hg (TLA) ve Ni (TLA) olmuştur.

• Öncelikli kirleticiler (Cd, Hg, Ni, Pb)

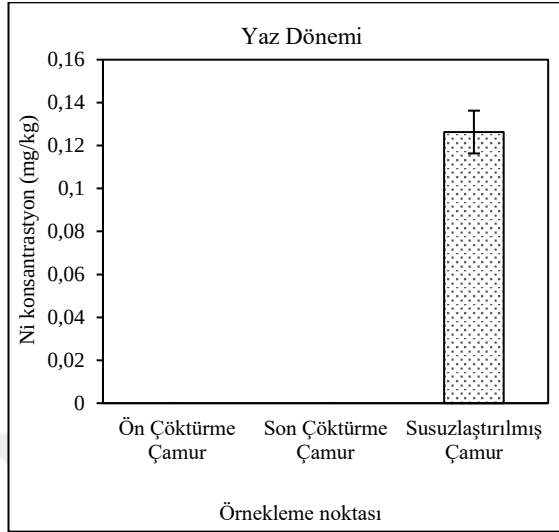
Yaz döneminde sıvı ve katı fazda Hg konsantrasyonları tespit limitinin altında görülmüştür. İncelenen diğer metallerin verileri aşağıda verilmiştir.

Yaz döneminde sıvı fazdaki ortalama toplam Cd konsantrasyonu, giriş akımında $0,12 \pm 0,004$ ppb, çıkış akımında $0,07 \pm 0,06$ ppb'dir. En düşük konsantrasyon son çöktürme çıkış suyunda ($0,03 \pm 0,03$ ppb) görülmüştür. Bütün arıtma aşamalarında çözünmüş fazda Cd konsantrasyonu tespit limitinin altında yok denilecek kadar az olmuştur. Katı fazda ise Cd konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda ortalama $0,01 \pm 0,0003$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,003 \pm 0,0003$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda ise $0,048 \pm 0,001$ mg/kg'dır (Şekil 4.1).



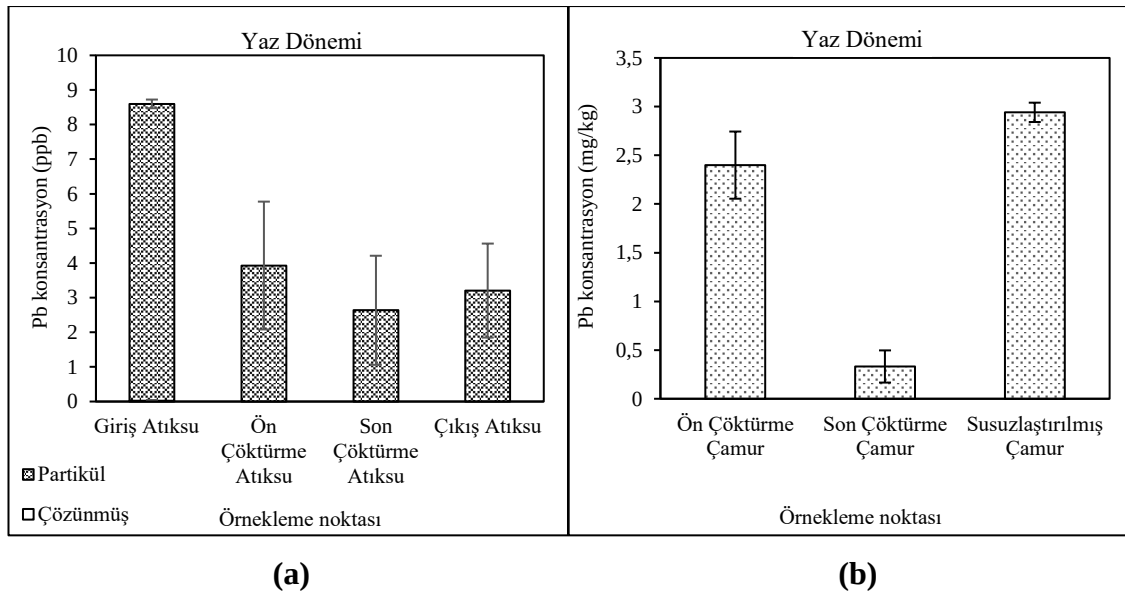
Şekil 4.1. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu

Ni konsantrasyonu yaz döneminde susuzlaştırılmış çamur dışındaki bütün arıtım aşamalarında tespit limitinin altında susuzlaştırılmış çamurda ise $0,13 \pm 0,010$ mg/kg olarak görülmüştür (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu

Pb konsantrasyonu toplam giriş atıksuyunda $8,60 \pm 0,15$ ppb, çıkış atıksuyunda $3,20 \pm 1,36$ ppb olduğu tespit edilmiştir. Çözünmüş fazda giriş akımında $0,02 \pm 0,02$ ppb olarak görülürken diğer aşamalarda tespit limitinin altında görülmüştür. Bütün aşamalarda Pb konsantrasyonun büyük bir kısmının partikül fazda olduğu görülmüştür. Katı fazda Pb konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $2,40 \pm 0,34$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,33 \pm 0,17$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $2,94 \pm 0,099$ mg/kg'dır (Şekil 4.3).



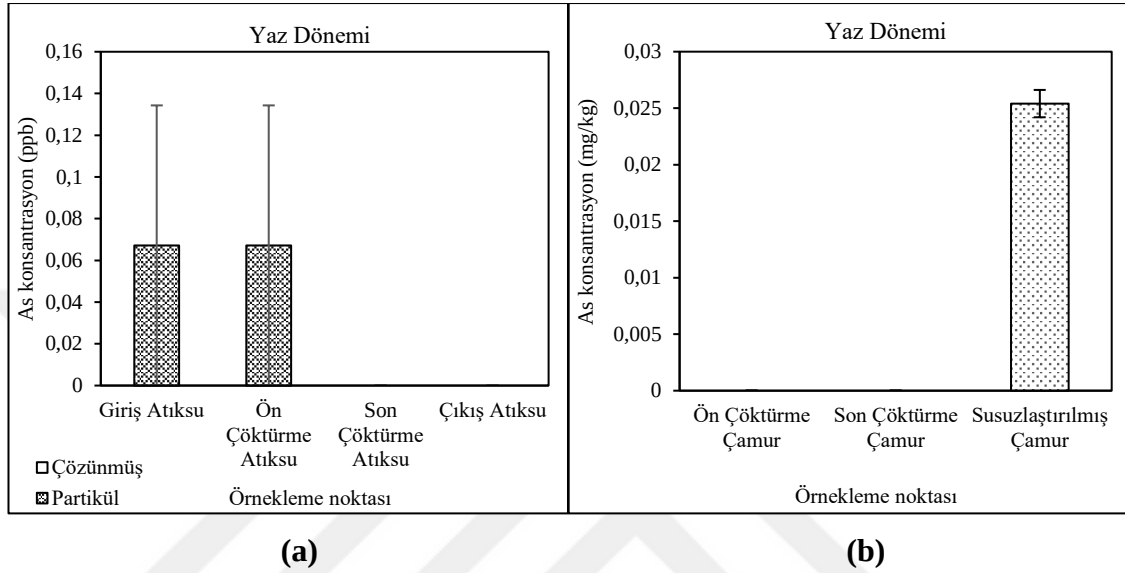
(a)

(b)

Şekil 4.3. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; (b) Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu

• **Potansiyel öncelikli maddeler (As, Cu, Cr, Zn)**

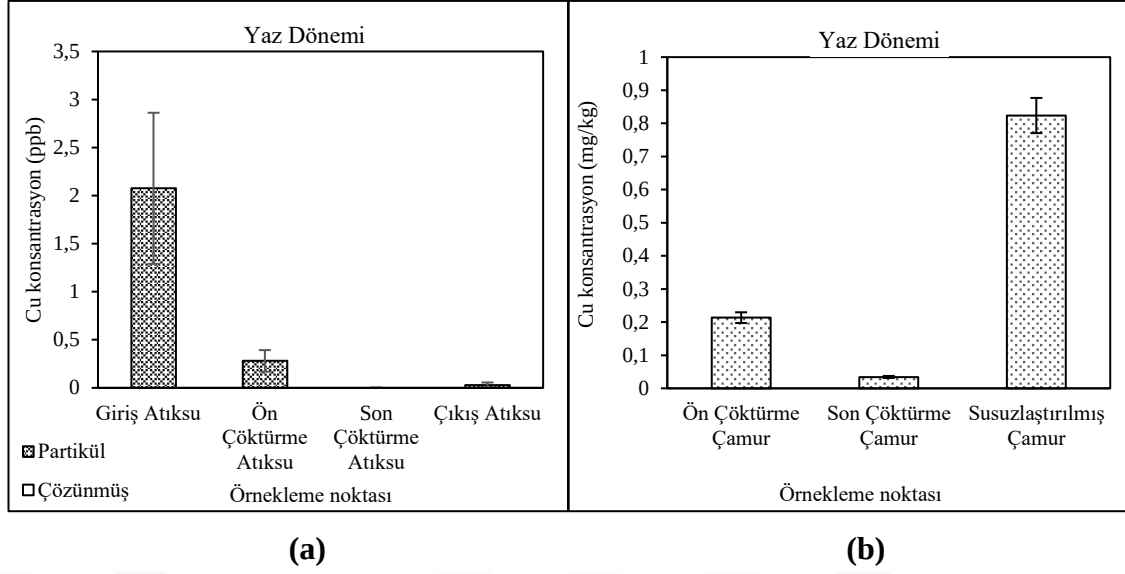
Toplam As konsantrasyonu giriş ve ön çöktürme atıksuyunda $0,06 \pm 0,060$ ppb olarak görülürken son çöktürme ve çıkış atıksuyunda tespit limitinin altında tespit edilmiştir. Ayrıca çözülmüş fazda da değerinin altında görülmüştür. Katı fazda As konsantrasyonu susuzlaştırılmış çamurda $0,025 \pm 0,001$ mg/kg iken ön çöktürme ve son çöktürme çamurunda tespit limitinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 4.4).



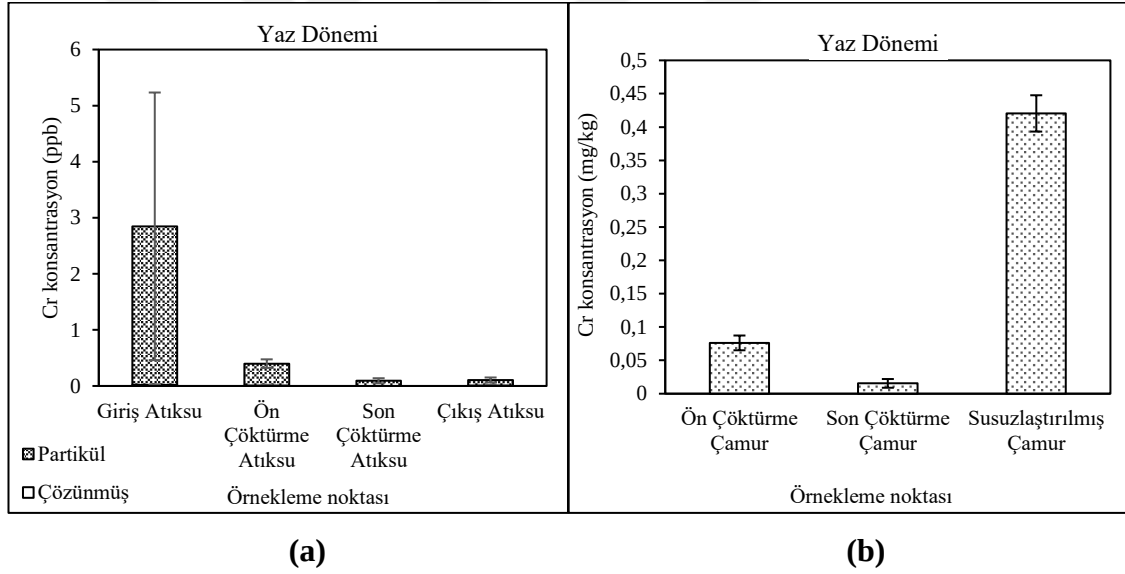
Şekil 4.4. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu

Yaz döneminde toplam Cu konsantrasyonu giriş akımında $2,08 \pm 0,79$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $0,29 \pm 0,11$ ppb, son çöktürme atıksuyunda tespit limitinin altında, çıkış atıksuyunda $0,03 \pm 0,028$ ppb olarak tespit edilmiş ve tüm arıtma aşamalarında çözülmüş fazda tespit limitinin altında olduğu görülmüştür. Katı fazda ise Cu konsantrasyonu ön çöktürme, son çöktürme ve susuzlaştırılmış çamurda sırasıyla $0,21 \pm 0,016$ mg/kg, $0,034 \pm 0,003$ mg/kg, $0,82 \pm 0,053$ mg/kg olmuştur (Şekil 4.5).

Yaz döneminde toplam Cr konsantrasyonu giriş, ön çöktürme, son çöktürme ve çıkış atıksuyunda sırasıyla $2,85 \pm 2,39$ ppb, $0,40 \pm 0,09$ ppb, $0,09 \pm 0,04$ ppb, $0,11 \pm 0,05$ ppb olduğu görülmüştür. Çözülmüş Cr konsantrasyonları düşük seviyelerde giriş akımında $0,02 \pm 0,01$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $0,01 \pm 0,01$ ppb, son çöktürme atıksuyunda tespit limitinin altında ve çıkış suyunda $0,01 \pm 0,01$ ppb olarak tespit edilmiştir. Katı fazdaki Cr konsantrasyonu, ön çöktürme çamurunda $0,076 \pm 0,011$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,015 \pm 0,007$ mg/kg, susuzlaştırılmış çamurda $0,42 \pm 0,027$ mg/kg'dır (Şekil 4.6).

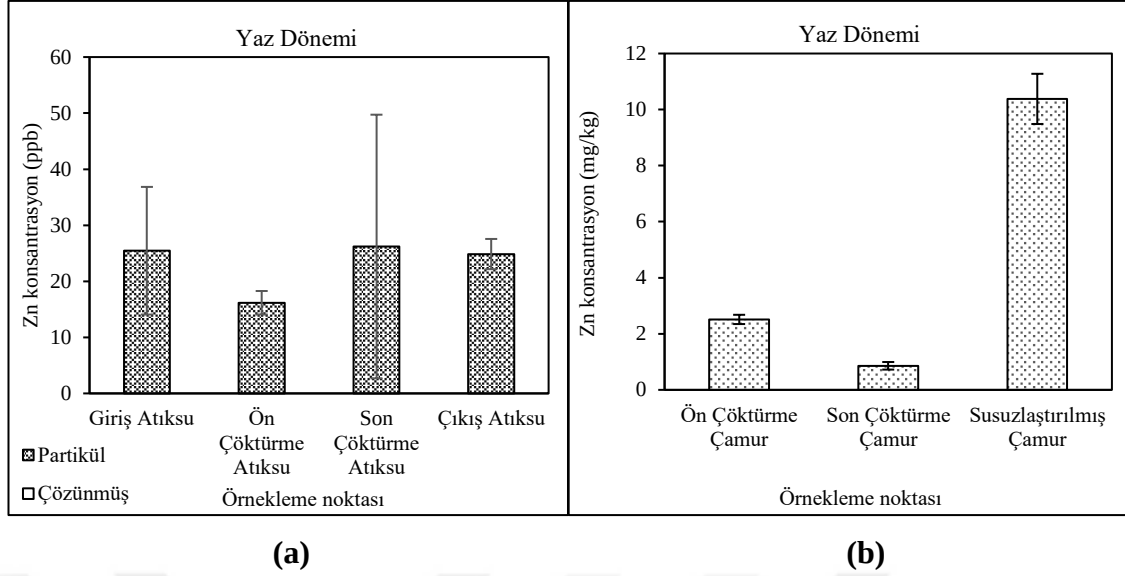


Şekil 4.5. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu



Şekil 4.6. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu

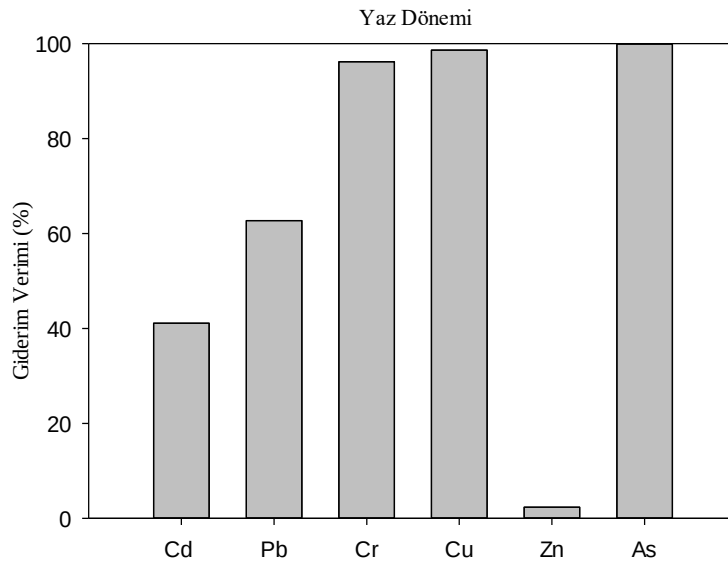
Toplam Zn konsantrasyonu giriş akımında $25,46 \pm 11,38$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $16,17 \pm 2,10$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $26,21 \pm 23,51$ ppb ve çıkış akımında $24,86 \pm 2,70$ ppb'dir. Zn haricinde, incelenen diğer metallerin yaz dönemi sonuçlarına göre giriş atıksu konsantrasyonu; ön çöktürme, son çöktürme ve özellikle de çıkış atıksu konsantrasyonundan yüksektir. Fakat Zn giriş atıksu konsantrasyonunun diğer arıtım aşamalarında korunduğu, farkın çok az olduğu görülmüştür. Çözünmüş fazda Zn konsantrasyonları bütün arıtım aşamalarında tespit limitinin altında olmuştur. Katı fazdaki Zn konsantrasyonları ön çöktürme çamurunda $2,51 \pm 0,17$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,86 \pm 0,13$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $10,38 \pm 0,90$ mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu

4.2.2. Yaz döneminde ağır metal giderim verimi

En yüksek ağır metal giderimi As (~ %100), Cu (%99), Cr (%96) ve Pb (%63)'de görülmüştür. Cd ve Zn'nin giderim verimi ise sırasıyla %41 ve %2 olmuştur. Zn yaz dönemi verilerine göre giderimi neredeyse hiç gerçekleşmemiştir. As giriş konsantrasyonu düşük seviyelerde tespit edildiğinden çıkış konsantrasyonu tespit limitinin altında kalmıştır ve giderim verimi max elde edilmiştir. Aynı şekilde Cd giriş konsantrasyonu da düşük seviyelerdedir fakat giderim verimi düşük olmasına rağmen kabul edilebilir çıkış konsantrasyonuna sahiptir. Hg ve Ni yaz dönemi atıksuyu verileri yok denilecek kadar az, tespit limitinin altında bulunduğu için bir giderim verimi hesaplanamamıştır. Yaz dönemindeki ağır metallerin giderim verimleri Şekil 4.8'de verilmiştir.



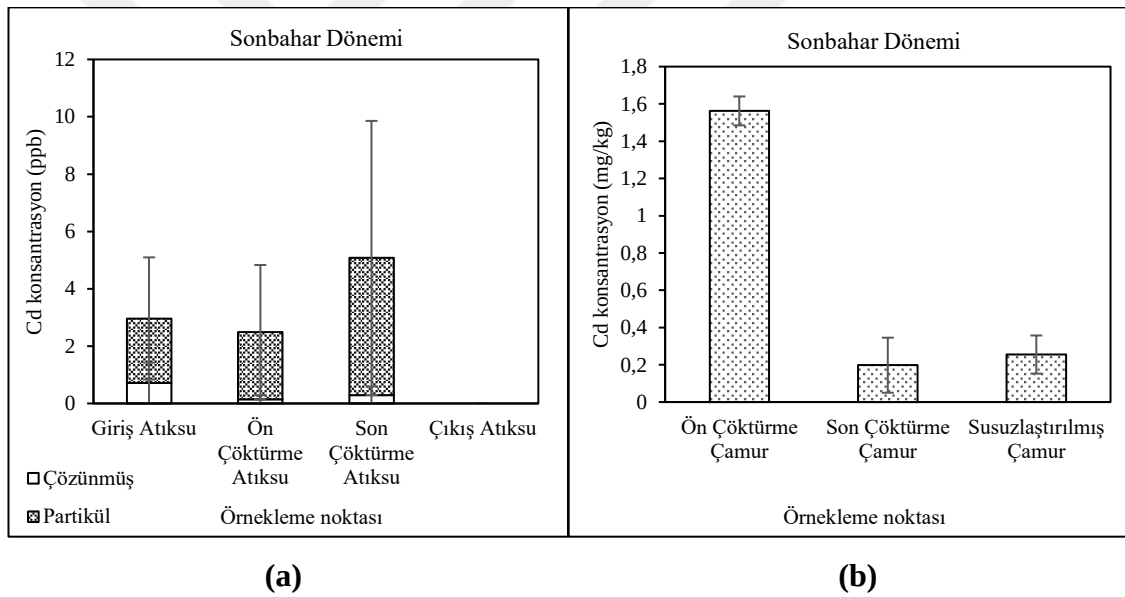
Şekil 4.8. Hurma AAT'de yaz dönemi ağır metal giderimi

4.2.3. Sonbahar dönemi ağır metal konsantrasyonları

Sonbahar döneminde tesise gelen en yüksek metaller Pb ($180,84 \pm 52,91$ ppb), Zn ($162,66 \pm 11,70$ ppb), Hg ($42,13 \pm 5,20$ ppb), Cu ($23,65 \pm 2,51$ ppb), Ni ($16,96 \pm 7,07$ ppb) iken en düşük metaller Cr ($6,94 \pm 1,51$ ppb), As ($5,55 \pm 2,98$ ppb) ve Cd ($2,96 \pm 2,84$ ppb) olmuştur.

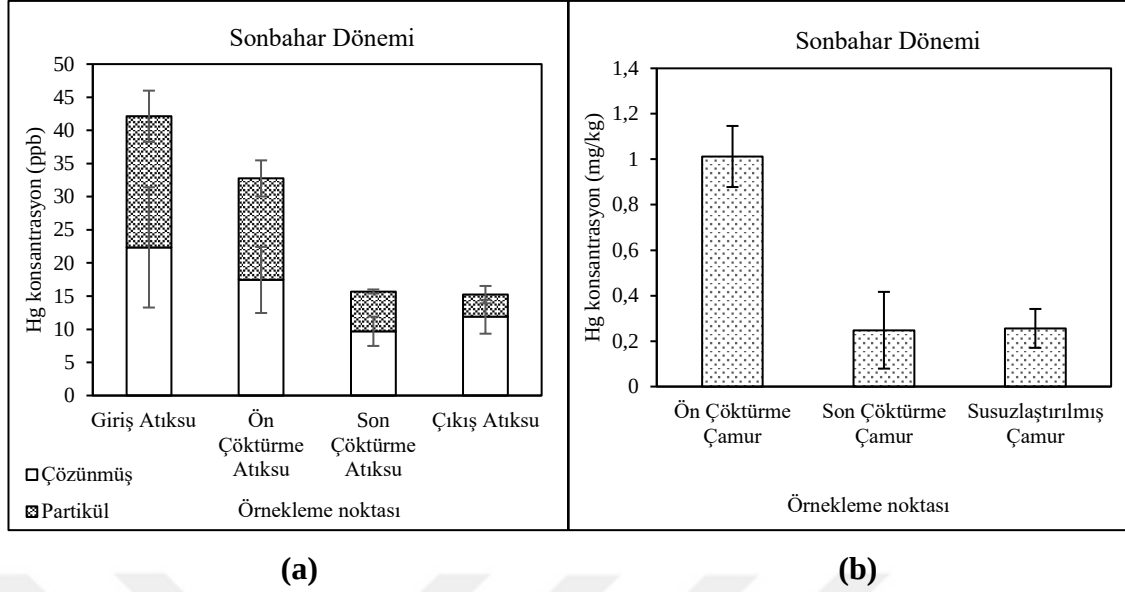
- **Öncelikli kirleticiler (Cd, Hg, Ni, Pb)**

Sonbahar döneminde sıvı fazda ortalama toplam Cd konsantrasyonu, giriş akımında $2,96 \pm 2,84$ ppb, çıkış akımında ise tespit limitinin altında olmuştur. En yüksek konsantrasyonun son çöktürme atıksuyunda $5,08 \pm 5,08$ ppb olduğu görülmüştür. Giriş akımında çözünmüş fazdaki Cd konsantrasyonu $0,71 \pm 0,71$ ve çıkış akımında tespit limitinin altında tespit edilmiştir. Ön çöktürme ve son çöktürme atıksuyundaki çözünmüş faz konsantrasyonları sırasıyla $0,14 \pm 0,14$; $0,30 \pm 0,30$ olmuştur. Katı fazda ise Cd konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda ortalama $1,56 \pm 0,078$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,20 \pm 0,15$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda ise $0,26 \pm 0,10$ mg/kg'dır (Şekil 4.9).



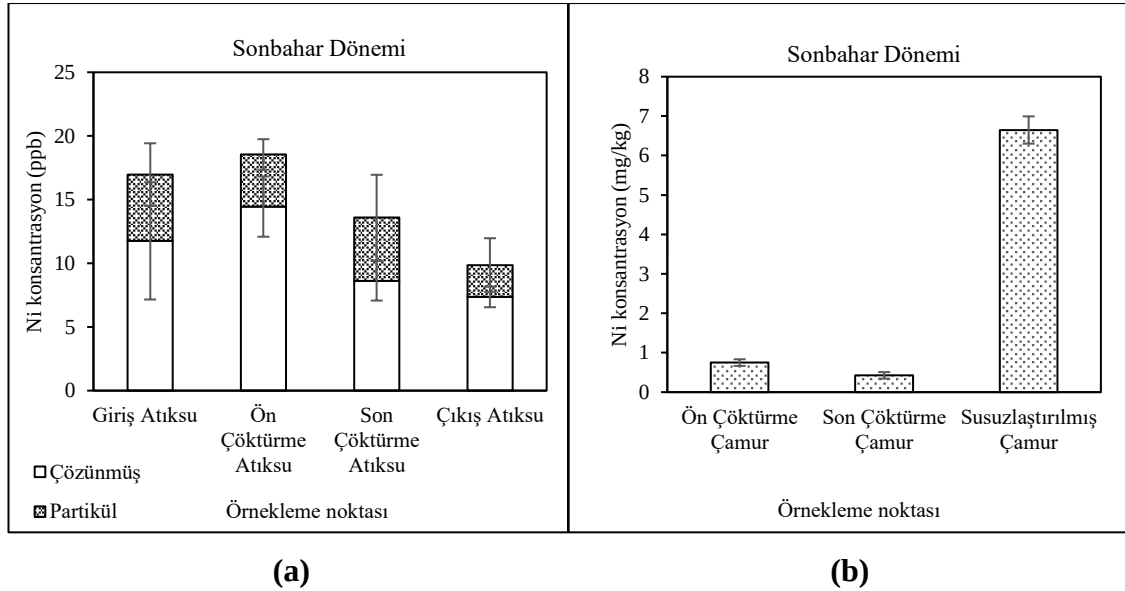
Şekil 4.9. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu

Toplam Hg konsantrasyonu giriş akımında $42,13 \pm 5,20$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $32,75 \pm 7,71$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $15,69 \pm 2,53$ ppb, çıkış atıksuyunda $15,22 \pm 1,25$ ppb olarak tespit edilmiştir. Hg konsantrasyonu, son çöktürme atıksuyunda diğer arıtım aşamalarından daha yüksek olmuştur. Partikül faz konsantrasyonu bütün arıtım aşamalarında çözünmüş faz konsantrasyonuna göre düşüktür. Katı fazda ise Hg konsantrasyonu ön çöktürme, son çöktürme ve susuzlaştırılmış çamurda sırasıyla $1,01 \pm 0,13$ mg/kg; $0,25 \pm 0,17$ mg/kg; $0,26 \pm 0,086$ mg/kg olmuştur (Şekil 4.10).



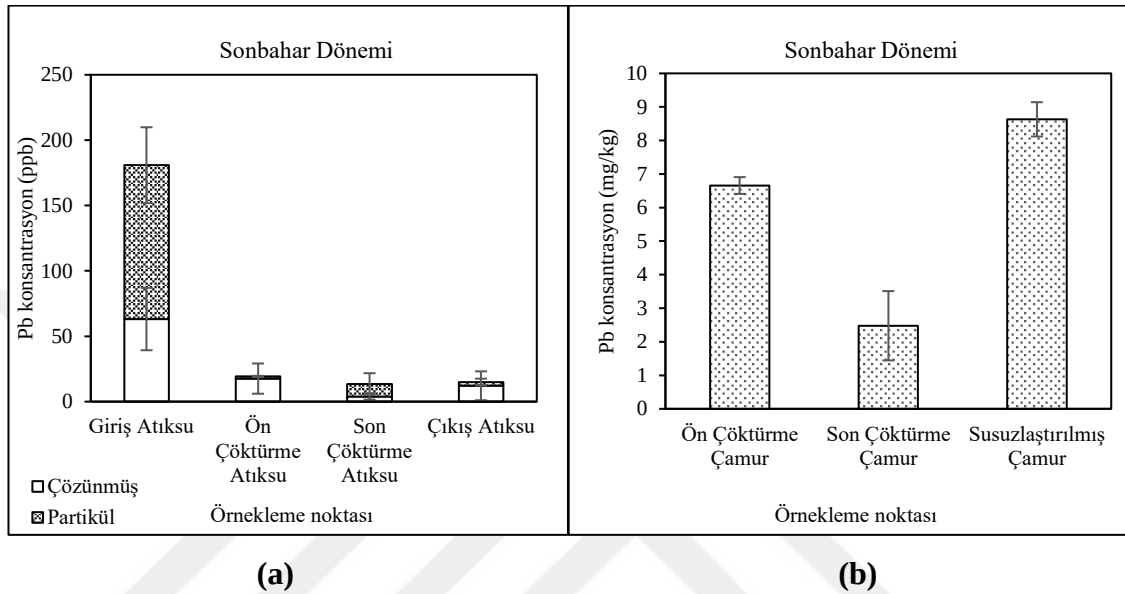
Şekil 4.10. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Hg konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Hg konsantrasyonu

Sonbahar döneminde sıvı fazda en yüksek Ni konsantrasyonu ön çöktürme atıksuyunda $18,54 \pm 3,56$ ppb olmuştur. Giriş akımında $16,96 \pm 7,07$ ppb, çıkış akımında $9,86 \pm 2,91$ ppb tespit edilmiştir. Bütün arıtım aşamalarında Ni konsantrasyonları çözünmüş faz partikül fazdan daha yüksektir. Giriş, ön çöktürme, son çöktürme ve çıkış akımındaki çözünmüş faz sırasıyla; $11,76 \pm 4,61$ ppb, $14,45 \pm 2,36$ ppb, $8,62 \pm 1,55$ ppb ve $7,36 \pm 2,11$ ppb'dir. Katı fazdaki Ni konsantrasyonları ön çöktürme çamurunda $0,75 \pm 0,084$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,42 \pm 0,082$ mg/kg, susuzlaştırılmış çamurda $6,65 \pm 0,35$ mg/kg olduğu görülmüştür (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Ni konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu

Pb konsantrasyonu toplam giriş atıksuyunda $180,84 \pm 52,91$ ppb, çıkış atıksuyunda $15,00 \pm 13,63$ ppb olduğu tespit edilmiştir. Ön çöktürme atıksuyunda $19,25 \pm 12,04$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $13,40 \pm 10,73$ ppb'dir. Ayrıca son çöktürme atıksuyunda diğer aşamalardan farklı olarak partikül faz ($9,43 \pm 8,36$ ppb), çözünmüş fazdan ($3,98 \pm 2,38$ ppb) fazla olmuştur. Katı fazda Pb konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $6,66 \pm 2,50$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $2,48 \pm 1,03$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $8,63 \pm 0,51$ mg/kg'dır (Şekil 4.12).

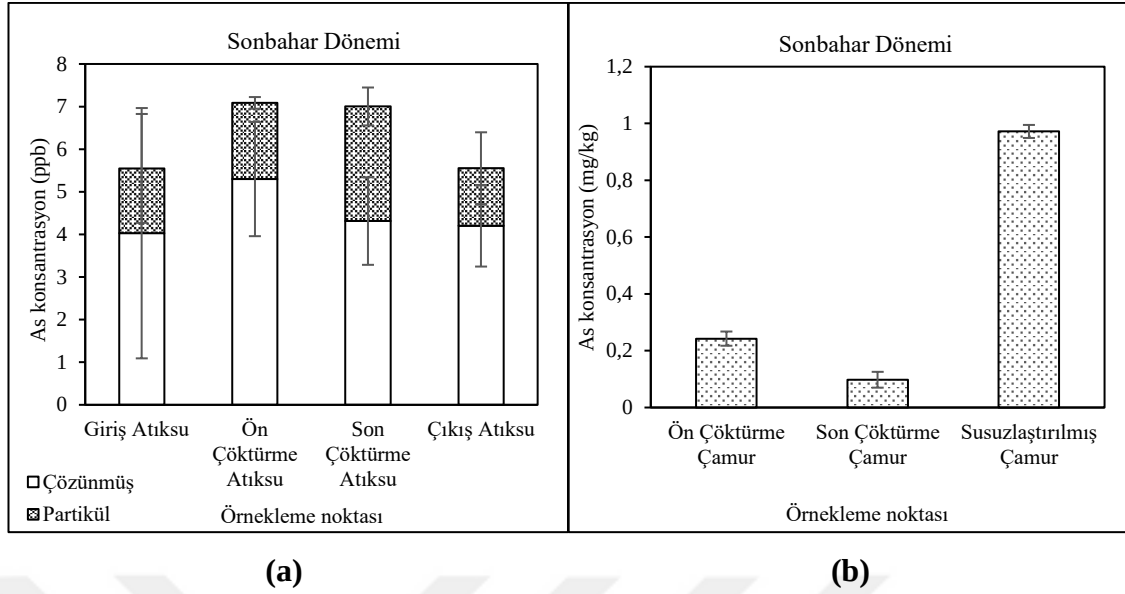


Şekil 4.12. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu

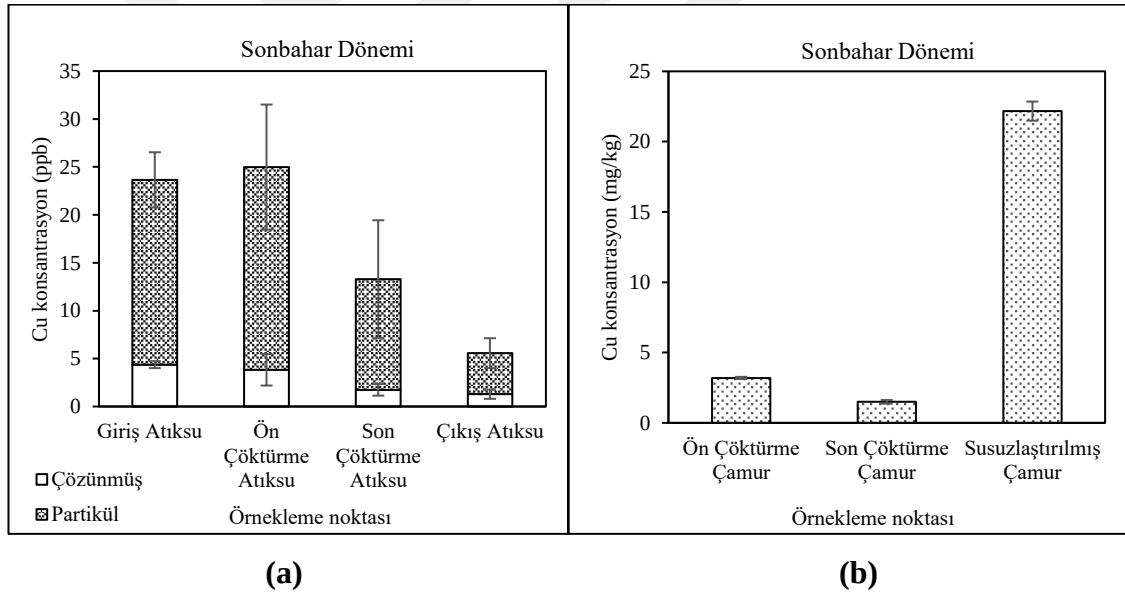
- Potansiyel öncelikli maddeler (As, Cu, Cr, Zn)**

Toplam As konsantrasyonu giriş akımında $5,548 \pm 2,98$ ppb, çıkış akımında $5,55 \pm 1,27$ ppb tespit edilmiştir. Bütün arıtım aşamalarında çözünmüş fazdaki konsantrasyon partikül fazdaki konsantrasyondan yüksek olmuştur ve en yüksek çözünmüş As konsantrasyonu ön çöktürme atıksuyunda $5,30 \pm 1,34$ ppb'dir. Katı fazda, ön çöktürme çamurunda $0,24 \pm 0,025$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,098 \pm 0,028$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $0,97 \pm 0,023$ mg/kg As konsantrasyonu tespit edilmiştir (Şekil 4.13).

Toplam Cu konsantrasyonu giriş atıksuyunda $23,65 \pm 2,51$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $24,99 \pm 8,18$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $13,30 \pm 6,74$ ppb ve çıkış atıksuyunda $5,56 \pm 2,05$ ppb'dir. Partikül fazdaki Cu konsantrasyonu tüm arıtım aşamalarında çözünmüş fazdaki konsantrasyondan yüksektir. En yüksek partikül fazdaki Cu konsantrasyonu ön çöktürme atıksuyunda $21,15 \pm 6,53$ ppb, en düşük ise çıkış akımında $4,28 \pm 1,56$ ppb'dir. Katı fazda ise ön çöktürme, son çöktürme ve susuzlaştırılmış çamurdaki Cu konsantrasyonu sırasıyla $3,19 \pm 0,076$ mg/kg; $1,49 \pm 0,13$ mg/kg; $22,17 \pm 0,68$ mg/kg'dır (Şekil 4.14).

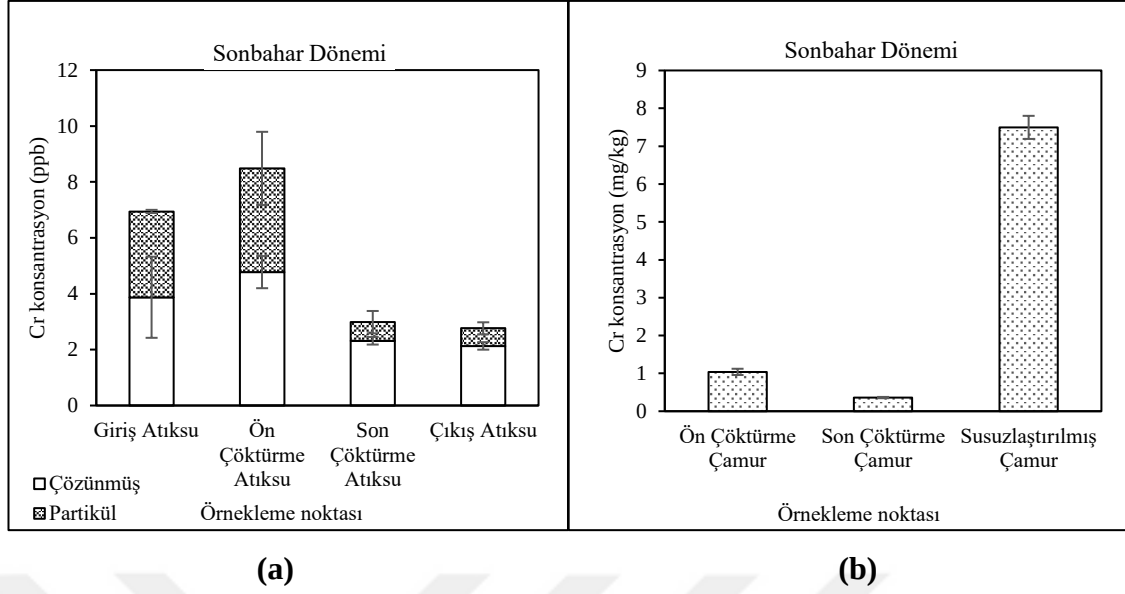


Şekil 4.13. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu



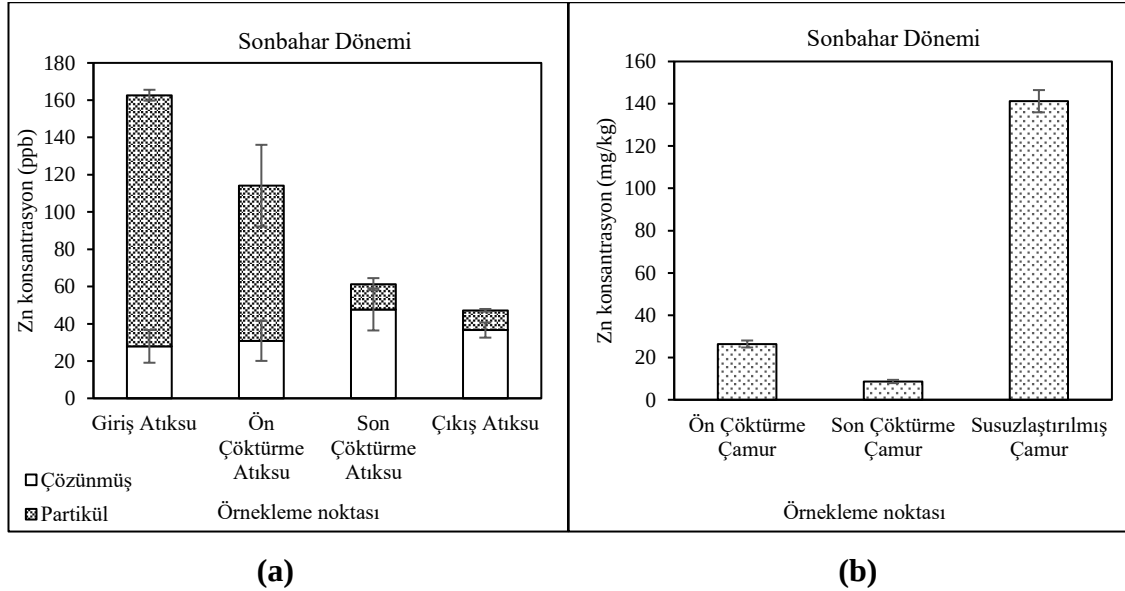
Şekil 4.14. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu

Sonbahar döneminde Cr konsantrasyonu giriş akımında $6,94 \pm 1,51$ ppb, çıkış akımında $2,76 \pm 0,08$ olarak tespit edilmiştir. En yüksek çözünmüş faz konsantrasyonları ön çöktürme atıksuyunda $4,77 \pm 0,58$ ppb, giriş atıksuyunda $3,87 \pm 1,45$ ppb olarak görülmüştür. Katı fazda ise ortalama toplam Cr konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $1,04 \pm 0,083$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,36 \pm 0,016$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $7,50 \pm 0,31$ mg/kg'dır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu

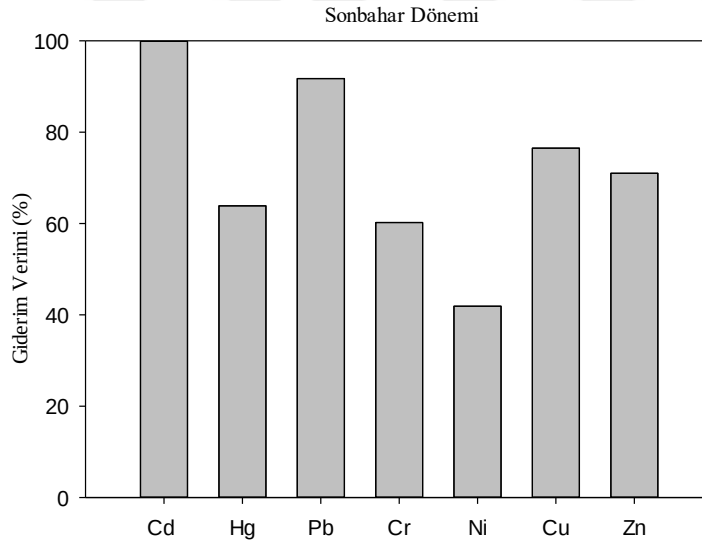
Toplam Zn konsantrasyonu giriş akımında $162,66 \pm 11,70$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $114,13 \pm 32,62$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $61,26 \pm 8,01$ ppb ve çıkış akımında $47,22 \pm 4,78$ ppb'dir. Partikül faz konsantrasyonları giriş, ön çöktürme, son çöktürme ve çıkış atıksuyunda sırasıyla, $134,78 \pm 2,92$ ppb; $83,34 \pm 21,92$ ppb; $13,56 \pm 3,26$ ppb; $10,59 \pm 0,72$ ppb'dir. Katı fazdaki Zn konsantrasyonları ön çöktürme çamurunda $26,38 \pm 1,65$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $8,64 \pm 0,78$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $141,21 \pm 5,26$ mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu

4.2.4. Sonbahar dönemi ağır metal giderim verimi

En yüksek ağır metal giderimi Cd (~ %100), Pb (%92), Cu (%76), Zn (%71)'de görülmüştür. Hg için %64, Cr için %60 ve Ni için %42 daha düşük giderim verimi gerçekleşmiştir. As çıkış konsantrasyonu giriş konsantrasyonundan yüksek tespit edilmiştir ve bu nedenle giderim gerçekleşmemiştir. Cd konsantrasyonu giriş akımında düşük konsantrasyon seviyelerinde tespit edilmiştir ve çıkış konsantrasyonu tespit limitinin altında kalmıştır. Bu sebeple maksimum giderim verimi elde edilmiştir. Ni, As ve Pb diğer metallere göre daha düşük giderim verimlerine sahip gözüktü de çıkış konsantrasyon değerleri yüksek değildir. Hg'nin çıkış konsantrasyonu giriş konsantrasyonundan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple Hg için bir giderim verimi görülmemiştir. Ayrıca, AAT'lerde atıksudan metal giderimi daha çok partikül fazın çökmesi ile gerçekleşmektedir. Sonuçlarda da hamsudaki partikül fazı daha yüksek olan metallerin giderimi daha yüksek olmuştur. Yani Cd, Pb, Cu ve Zn'nin giriş atıksuyundaki partikül fazın çözünmüş fazdan daha yüksek olduğu ve giderim verimlerinin de aynı şekilde yüksek olduğu görülürken Ni'nin giriş atıksuyunda çözünmüş fazın daha yüksek giderim veriminin de daha düşük olduğu görülmüştür. Sonbahar dönemindeki ağır metallerin giderim verimleri Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Hurma AAT'de sonbahar dönemi ağır metal giderimi

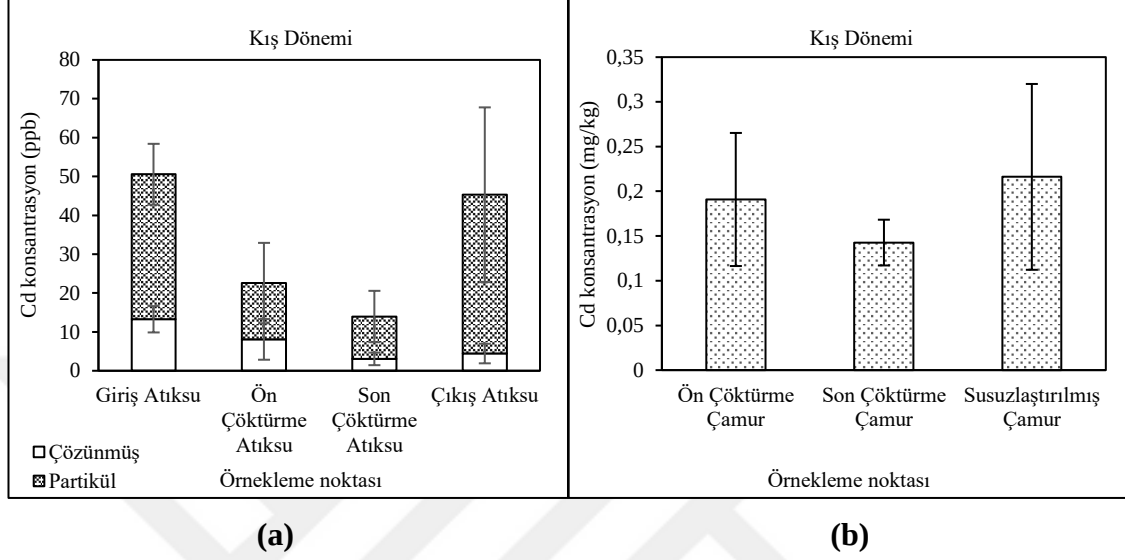
4.2.5. Kış dönemi ağır metal konsantrasyonları

Kış dönemindeki tesise gelen en yüksek metaller Zn ($432,80 \pm 35,40$ ppb), Pb ($272,68 \pm 357,93$ ppb), Cd ($50,57 \pm 11,03$ ppb) ve Cu ($39,54 \pm 12,21$ ppb) iken en düşük metaller Ni ($19,80 \pm 6,37$ ppb), Cr ($12,11 \pm 3,67$ ppb), Hg ($1,21 \pm 1,71$ ppb) ve As ($0,78 \pm 0,55$ ppb)'dir.

- **Öncelikli kirleticiler (Cd, Hg, Ni, Pb)**

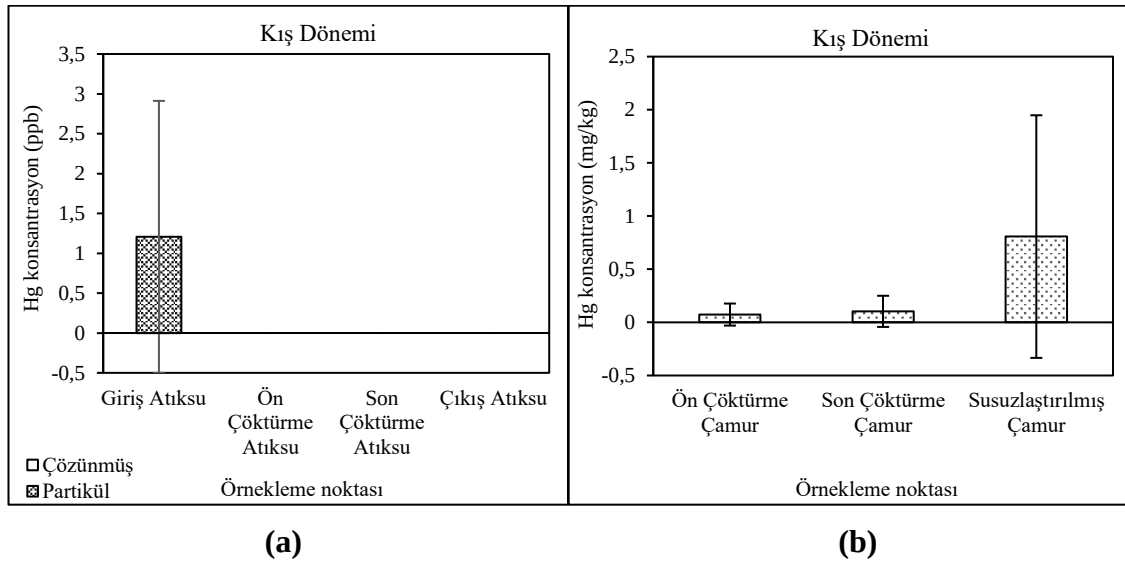
Kış döneminde Cd konsantrasyonu giriş akımında $50,57 \pm 11,03$ ppb olurken diğer dönemlere göre en yüksek çıkış akımı konsantrasyonu $45,30 \pm 21,80$ ppb olmuştur. Bütün arıtım aşamalarında partikül fazdaki Cd konsantrasyonu çözünmüş fazdaki

konsantrasyondan daha yüksek olmuş ve en yüksek partikül faz konsantrasyonu çıkış akımında $40,86 \pm 22,49$ ppb olmuştur. Katı fazdaki Cd konsantrasyonları yaklaşık olarak benzer sonuçlar gözlenmiş ve ön çöktürme çamurunda $0,19 \pm 0,074$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,143 \pm 0,026$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $0,22 \pm 0,10$ mg/kg'dır (Şekil 4.18).



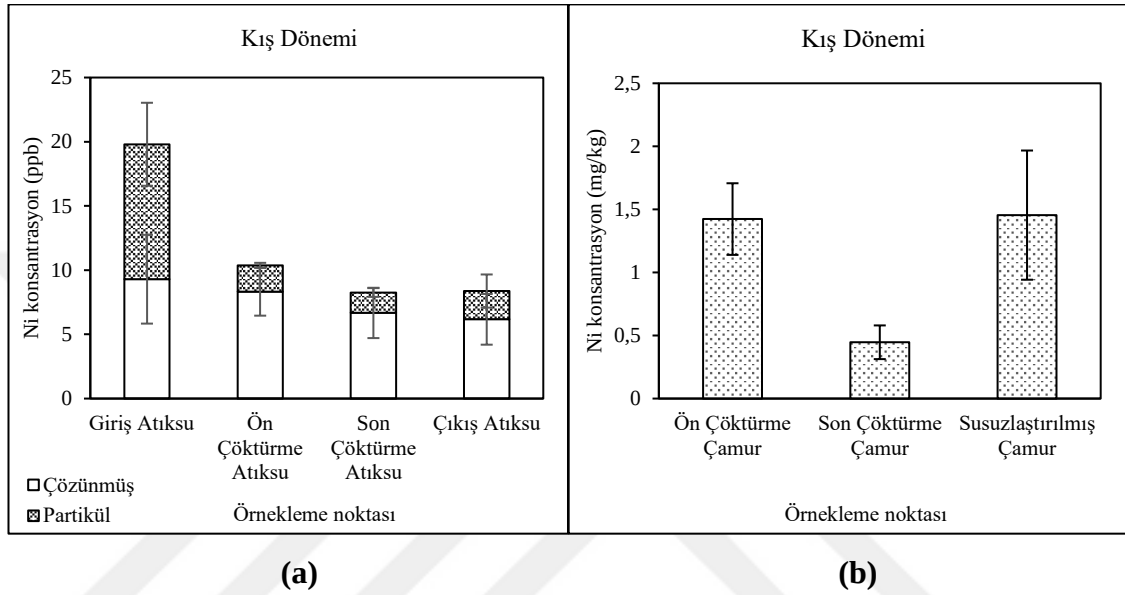
Şekil 4.18. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu

Kış döneminde toplam Hg konsantrasyonu giriş akımında $1,21 \pm 1,71$ ppb, diğer arıtım aşamalarında ise tespit limitinin altında tespit edilmiştir. Giriş akımındaki çözünmüş fazda Hg konsantrasyonu tespit limitinin altında olduğu görülmüştür. Katı fazda ise ön çöktürme çamurunda $0,073 \pm 0,10$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,10 \pm 0,15$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda ise $0,81 \pm 1,14$ mg/kg'dır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Hg konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Hg konsantrasyonu

Toplam Ni konsantrasyonu giriş akımında $19,80 \pm 6,37$ ppb, çıkış akımında $8,37 \pm 3,17$ ppb'dir. Bütün arıtım aşamalarında çözünmüş fazdaki Ni konsantrasyonu partikül fazdaki konsantrasyondan fazla olmuş ve yaklaşık olarak benzer konsantrasyonlardadır. Giriş, ön çöktürme, son çöktürme ve çıkış akımındaki çözünmüş faz Ni konsantrasyonu sırasıyla, $9,29 \pm 3,45$ ppb; $8,34 \pm 1,88$ ppb; $6,67 \pm 1,96$ ppb; $6,17 \pm 1,97$ ppb'dir. Katı fazdaki Ni konsantrasyonu ise ön çöktürme çamurunda $1,42 \pm 0,28$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,45 \pm 0,13$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $1,45 \pm 0,51$ mg/kg'dır (Şekil 4.20).

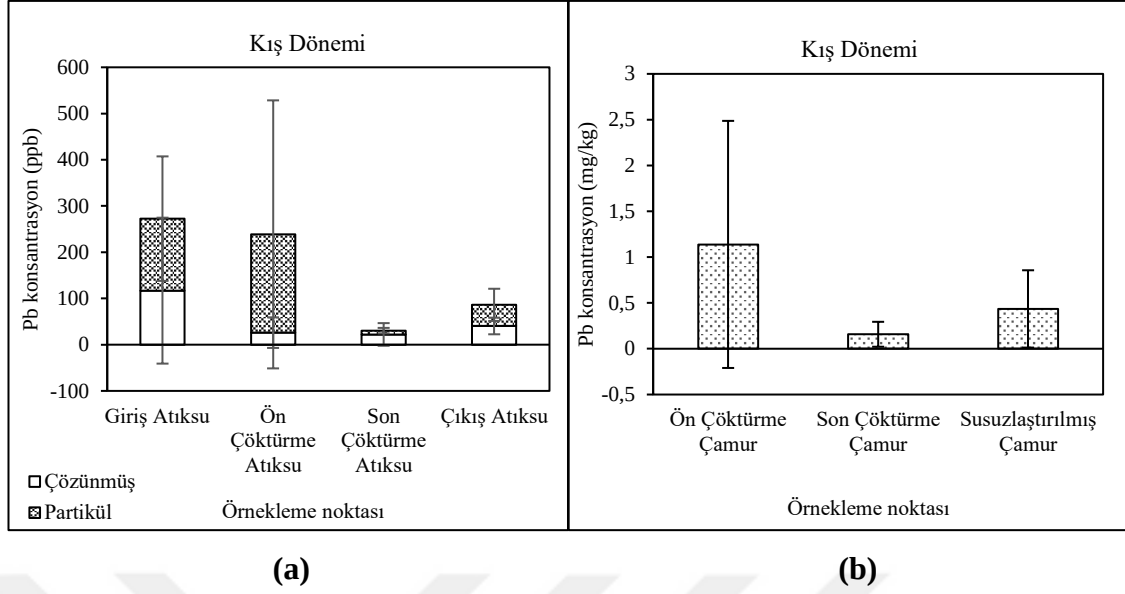


Şekil 4.20. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Ni konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu

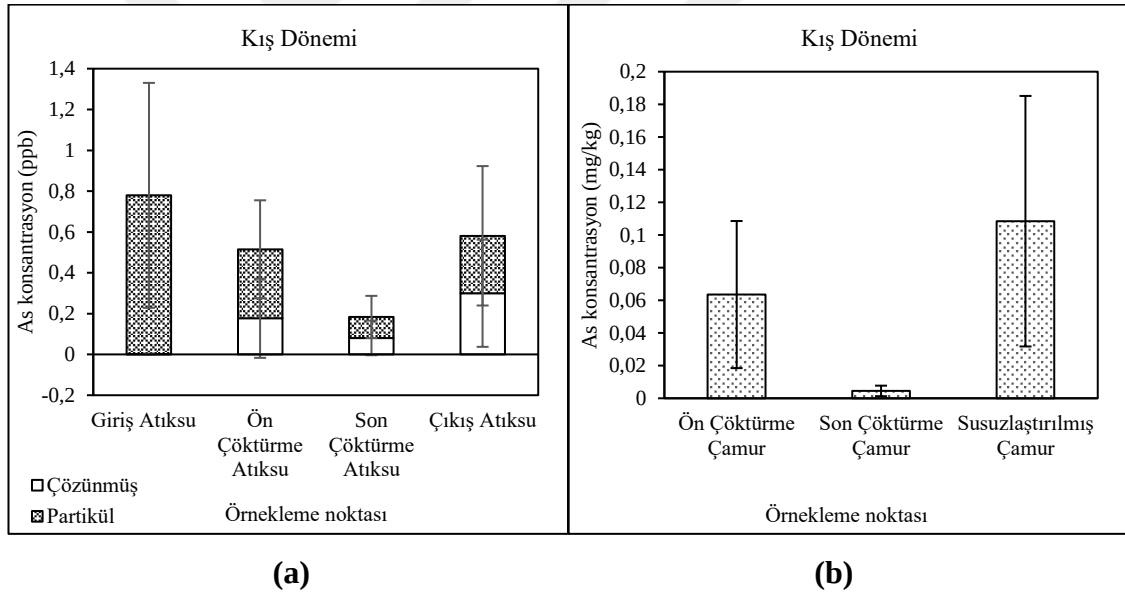
Kış dönemindeki Pb konsantrasyonu giriş akımında $272,68 \pm 357,93$ ppb, çıkış akımında ise $86,17 \pm 64,59$ ppb olmuştur. Giriş akımında partikül fazdaki Pb konsantrasyonu $155,77 \pm 134,66$ ppb, çıkış akımında ise $45,72 \pm 34,83$ ppb'dir. Katı fazdaki Pb konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $1,14 \pm 1,35$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,16 \pm 0,14$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda ise $0,43 \pm 0,42$ mg/kg'dır (Şekil 4.21).

- **Potansiyel öncelikli maddeler (As, Cu, Cr, Zn)**

Kış döneminde As konsantrasyonu giriş atıksuyunda $0,78 \pm 0,55$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $0,52 \pm 0,40$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $0,18 \pm 0,19$ ppb çıkış atıksuyunda $0,58 \pm 0,43$ ppb'dir. En yüksek partikül fazdaki As konsantrasyonu giriş akımında $0,77 \pm 0,55$ ppb'dir. Katı fazdaki As konsantrasyonu, ön çöktürme, son çöktürme ve susuzlaştırılmış çamurda sırasıyla, $0,064 \pm 0,045$ mg/kg; $0,005 \pm 0,003$ mg/kg; $0,11 \pm 0,08$ mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.22).

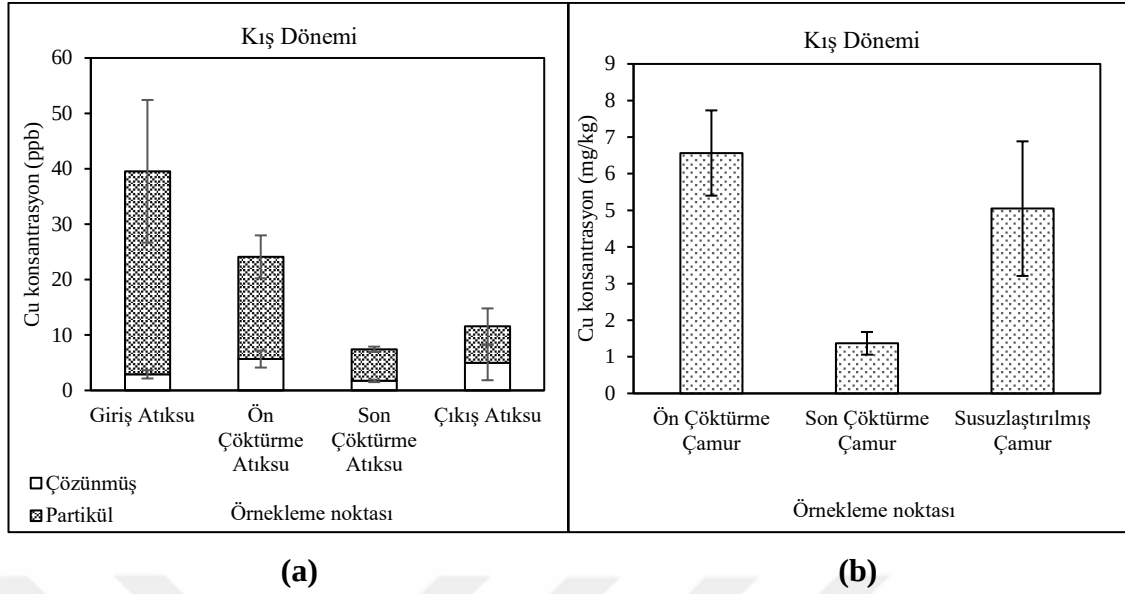


Şekil 4.21. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu



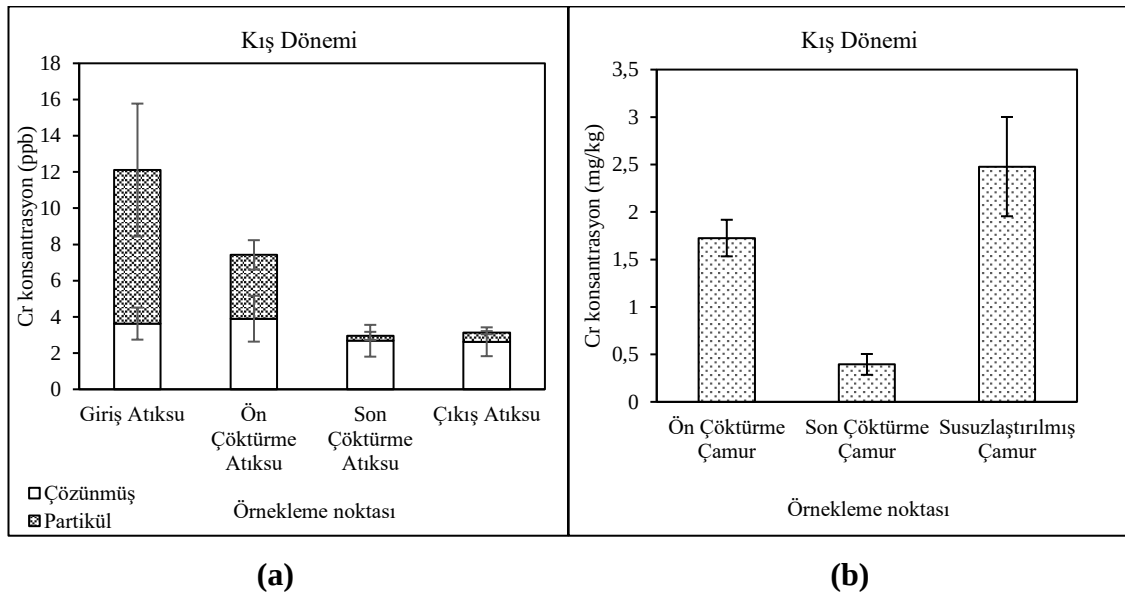
Şekil 4.22. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu

Kış dönemi Cu konsantrasyonu giriş akımında toplam $39,54 \pm 12,21$ ppb, çözünmüş fazda $2,91 \pm 0,75$ ppb'dir. Çıkış akımında ise toplam $11,57 \pm 5,24$ ppb, çözünmüş fazda $5,00 \pm 3,16$ ppb olarak tespit edilmiştir. En yüksek partikül faz konsantrasyonu ise ön çöktürme tankında $5,66 \pm 1,53$ ppb'dir. Katı fazdaki Cu konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $6,57 \pm 1,16$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $1,37 \pm 0,31$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $5,05 \pm 1,84$ mg/kg'dır (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu

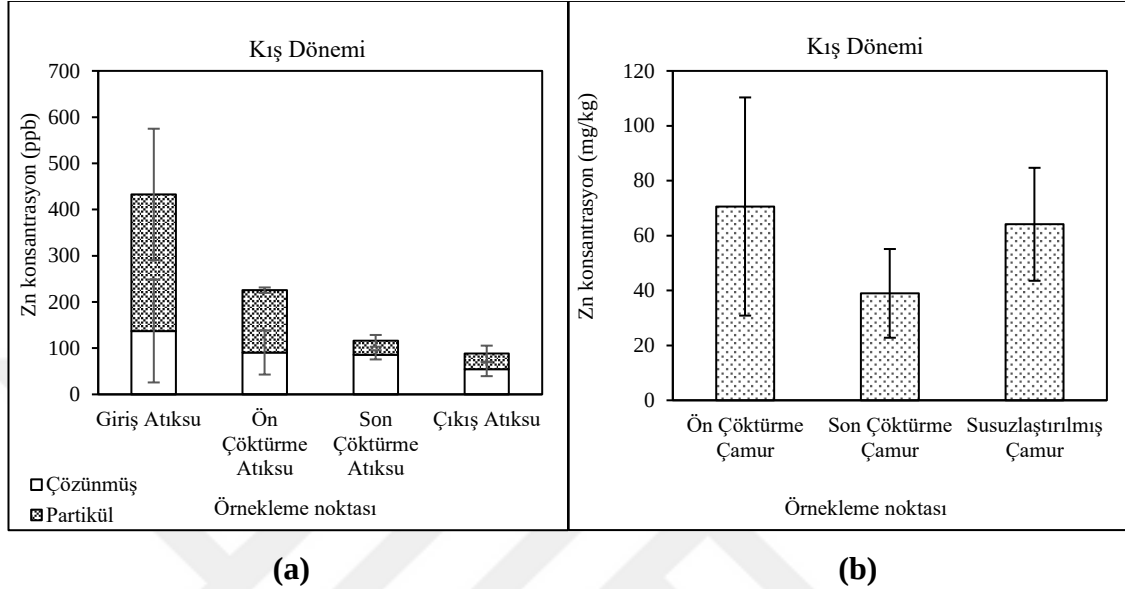
Toplam Cr konsantrasyonu giriş akımında $12,11 \pm 3,67$ ppb, çıkış akımında $3,12 \pm 0,88$ ppb'dir. Çözünmüş fazdaki Cr konsantrasyonları ise giriş atıksuyunda $3,63 \pm 0,89$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $3,90 \pm 1,27$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $2,70 \pm 0,88$ ppb ve çıkış atıksuyunda $2,63 \pm 0,80$ ppb olarak tespit edilmiştir. Katı fazdaki Cr konsantrasyonları ise ön çöktürme, son çöktürme ve susuzlaştırılmış çamurda sırasıyla, $1,73 \pm 0,19$ mg/kg; $3,99 \pm 0,11$ mg/kg; $2,48 \pm 0,52$ mg/kg'dır. (Şekil 4.24)



Şekil 4.24. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu

Kış döneminde giriş akımındaki Zn konsantrasyonu toplam $432,80 \pm 35,40$ ppb, çözünmüş fazda $137,18 \pm 111,41$ ppb'dir. Çıkış akımındaki Zn konsantrasyonu $88,21 \pm$

19,91 ppb, çözünmüş fazda ise $54,51 \pm 15,07$ ppb'dir. Katı fazdaki Zn konsantrasyonu diğer dönemlerden farklı olarak ön çöktürme çamurunda susuzlaştırılmış çamurdan daha yüksek çıkmıştır. Ön çöktürme çamurundaki Zn konsantrasyonu $70,60 \pm 39,74$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $38,96 \pm 16,16$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurdaki konsantrasyonu ise $64,12 \pm 20,58$ mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.25).



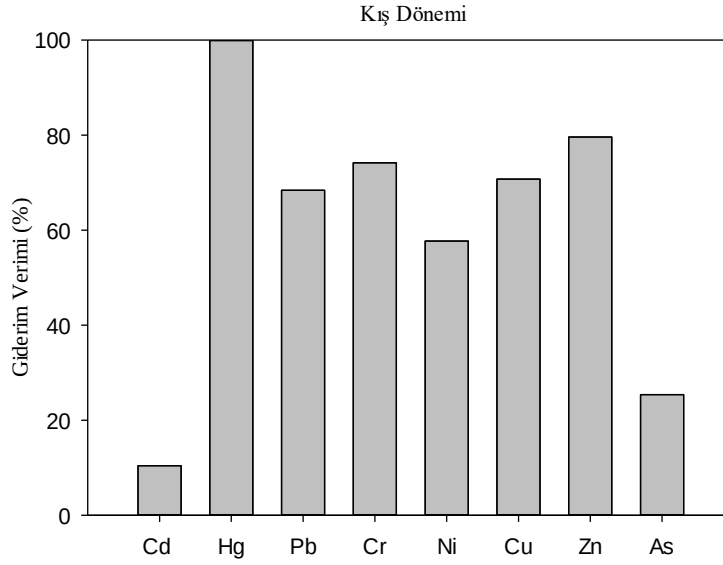
Şekil 4.25. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu

4.2.6. Kış dönemi ağır metal giderim verimi

Kış dönemi en yüksek giderim verimi sırasıyla, Hg (~ %100), Zn (%80), Cr (%74), Cu (%71), Pb (%68) ve Ni (%58) şeklinde olmuştur. Yüksek giderim verimine sahip bu metallerin giriş atıksuyundaki partikül fazları çözünmüş fazdan yüksek olmuştur. Ayrıca partikül fazda giderimin daha çok olduğunu gösteren bir diğer durumsa çıkış atıksuyundaki çözünmüş fazın partikül faza göre artışıdır. Bu metallerde de çıkış suyundaki çözünmüş fazlarda artış gözlenmiştir. As (%25) ve Cd (%10) için düşük giderim verimi gerçekleşmiştir. Hg'nin giriş konsantrasyonu çok düşük olduğu için çıkış konsantrasyonu tespit limitinin altında kalmıştır ve maksimum giderim verimi gerçekleşmiştir. Zn giderim verimi yüksek olmasına rağmen diğer metallere göre en yüksek çıkış konsantrasyonuna sahiptir. Kış giderim verimleri Şekil 4.26'da verilmiştir.

4.2.7. İlkbahar dönemi ağır metal konsantrasyonları

İlkbahar döneminde tesise gelen en yüksek metaller Zn ($315,67 \pm 58,62$ ppb), Cu ($60,91 \pm 26,21$ ppb) ve Ni ($41,44 \pm 32,87$ ppb) olurken en düşük metaller Cr ($14,97 \pm 4,00$ ppb), Cd ($9,66 \pm 6,06$ ppb), Pb ($7,83 \pm 5,70$ ppb), As ($4,48 \pm 2,14$ ppb) ve Hg (TLA) olmuştur.



Şekil 4.26. Hurma AAT'de kış dönemi ağır metal giderimi

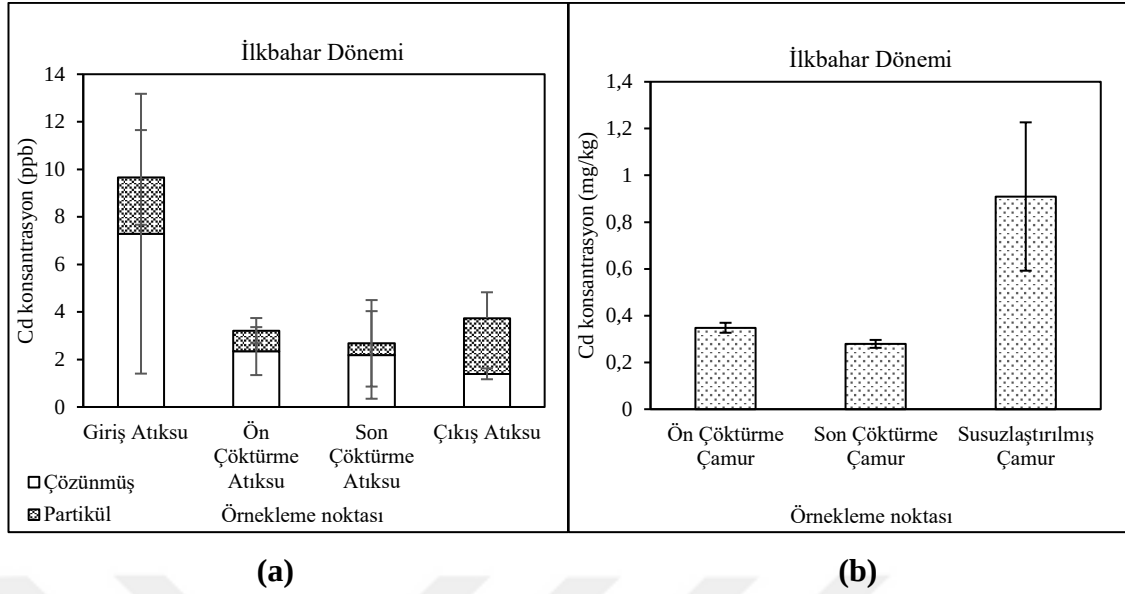
- **Öncelikli kirleticiler (Cd, Hg, Ni, Pb)**

İlkbahar dönemi Cd konsantrasyonu giriş akımında toplam $9,66 \pm 6,06$ ppb, çözünmüş fazda $7,29 \pm 5,89$ ppb'dir. Çıkış akımındaki Cd konsantrasyonu ise toplam $3,73 \pm 0,99$ ppb, çözünmüş fazda $1,39 \pm 0,23$ ppb'dir. Katı fazdaki Cd konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $0,35 \pm 0,021$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,28 \pm 0,016$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $0,91 \pm 0,32$ mg/kg'dır (Şekil 4.27).

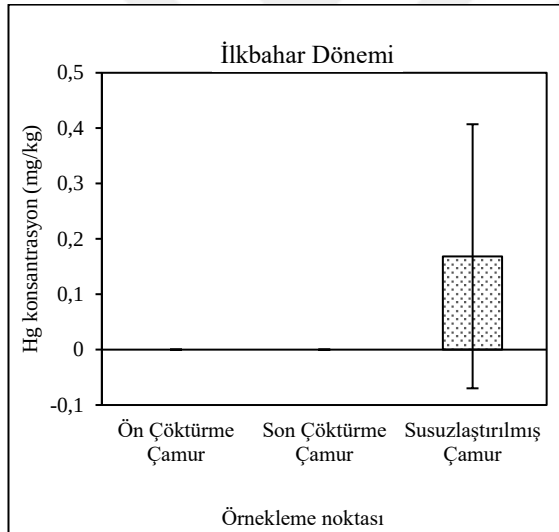
Hg konsantrasyonu yaz döneminde susuzlaştırılmış çamur dışındaki bütün arıtım aşamalarında tespit limitinin altında, susuzlaştırılmış çamurda ise $0,17 \pm 0,24$ mg/kg olarak görülmüştür (Şekil 4.28).

Toplam Ni konsantrasyonu giriş akımında $41,44 \pm 32,87$ ppb, çıkış akımında $19,36 \pm 7,30$ ppb'dir. Çözünmüş fazdaki Ni konsantrasyonları benzer şekilde olup giriş atıksuyunda $11,37 \pm 0,60$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $15,70 \pm 2,57$ ppb, son çöktürme atıksuyuna $10,36 \pm 1,30$ ppb ve çıkış atıksuyunda $12,02 \pm 1,87$ ppb olarak tespit edilmiştir. Katı fazdaki Ni konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $2,19 \pm 0,15$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,60 \pm 0,14$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $6,21 \pm 2,11$ mg/kg'dır (Şekil 4.29).

Giriş akımındaki Pb konsantrasyonu toplam $7,83 \pm 5,70$ ppb, partikül fazda $6,88 \pm 6,47$ ppb'dir. Çıkış akımındaki Pb konsantrasyonu toplam $4,90 \pm 1,68$ ppb, partikül fazda $1,76 \pm 0,49$ ppb'dir. Katı fazdaki Pb konsantrasyonu ise ön çöktürme, son çöktürme ve susuzlaştırılmış çamur için sırasıyla, $1,01 \pm 0,29$ mg/kg; $0,22 \pm 0,16$ mg/kg; $3,35 \pm 0,76$ mg/kg'dır (Şekil 4.30).



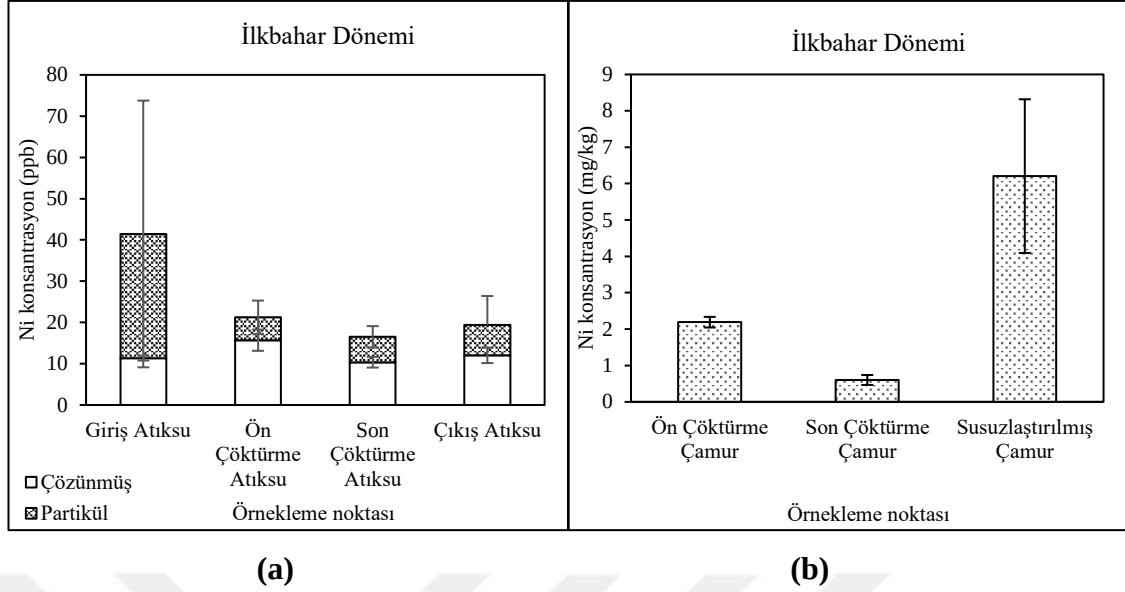
Şekil 4.27. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cd konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cd konsantrasyonu



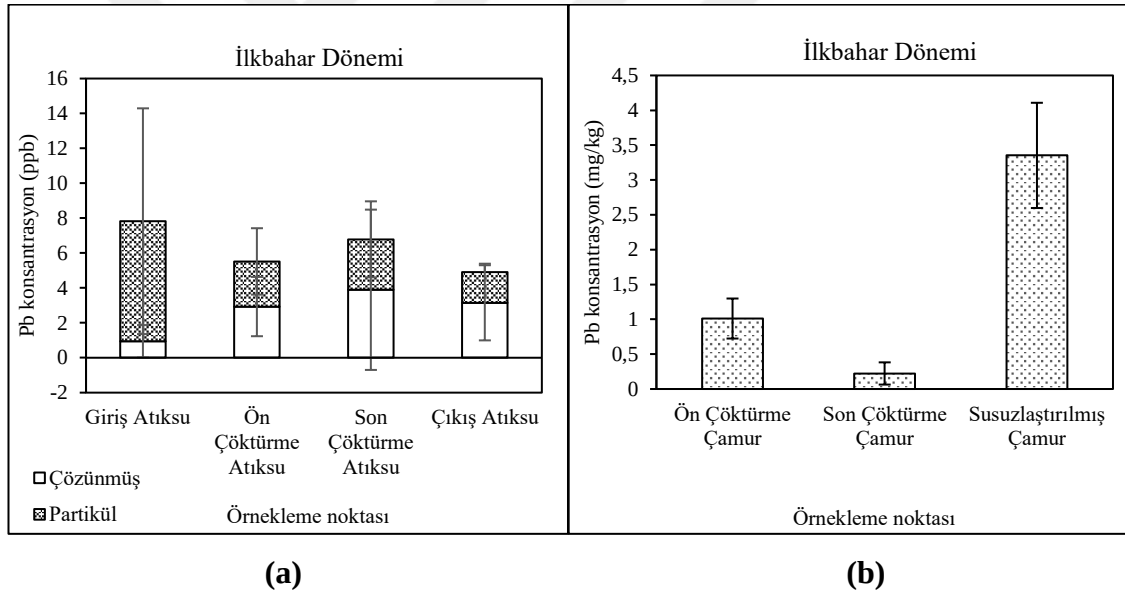
Şekil 4.28. Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Hg konsantrasyonu

- Potansiyel öncelikli maddeler (As, Cu, Cr, Zn)**

İlkbahar dönemi As konsantrasyonu giriş akımında toplam $4,48 \pm 2,14$ ppb, çözünmüş fazda $2,46 \pm 0,90$ ppb'dir. Çıkış akımındaki As konsantrasyonu ise toplam $2,42 \pm 0,38$ ppb, çözünmüş fazda $1,78 \pm 0,48$ ppb'dir. Katı fazdaki As konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $0,27 \pm 0,046$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $0,067 \pm 0,031$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $1,18 \pm 0,46$ mg/kg'dır (Şekil 4.31).

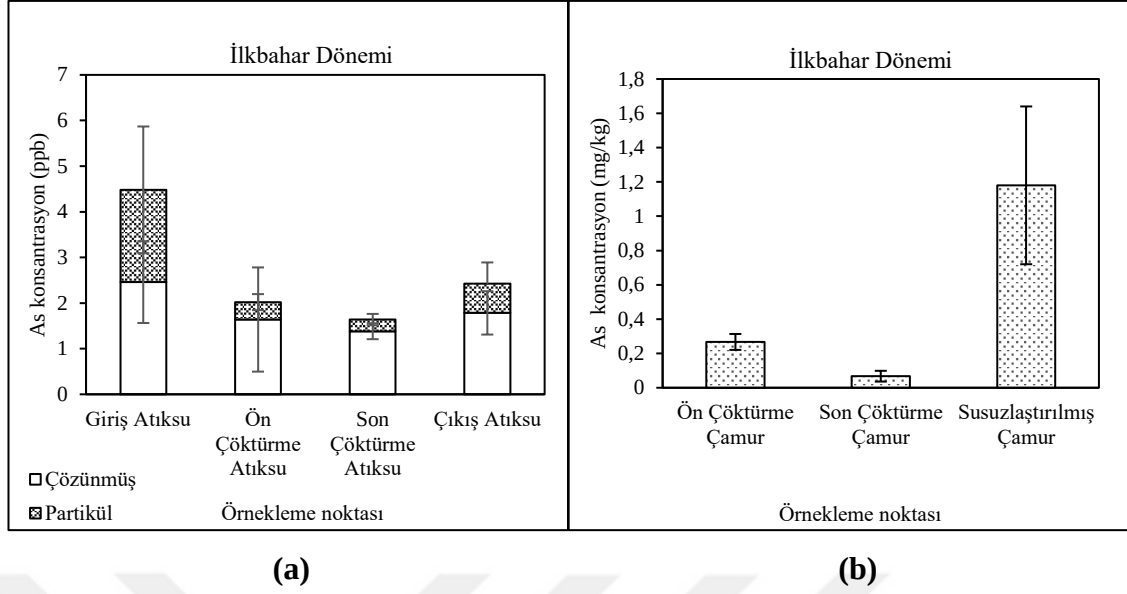


Şekil 4.29. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Ni konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Ni konsantrasyonu

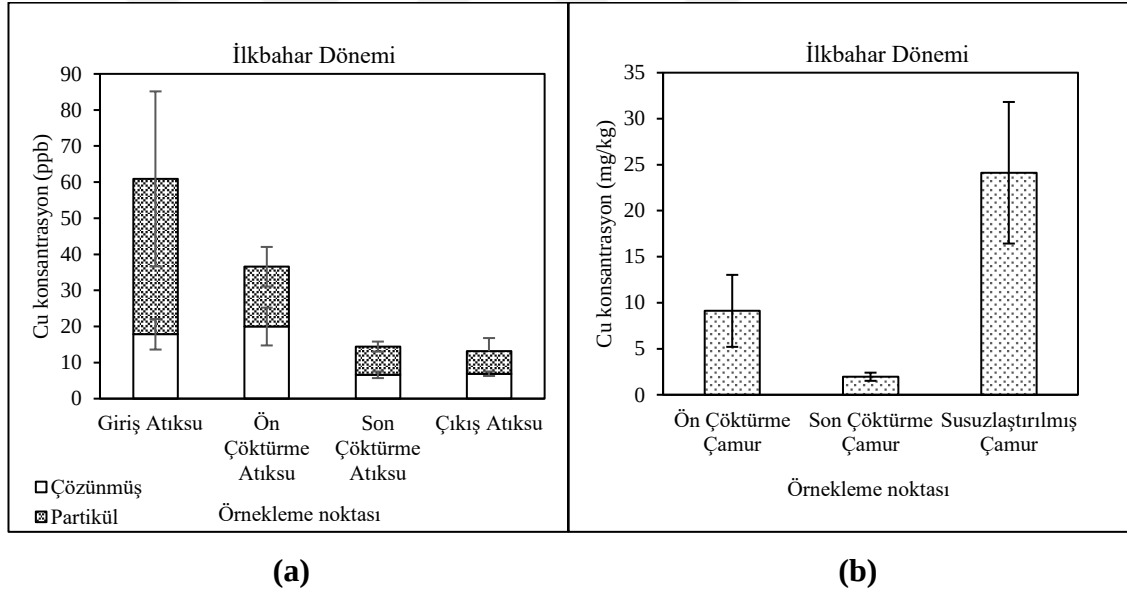


Şekil 4.30. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Pb konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Pb konsantrasyonu

Toplam Cu konsantrasyonu giriş akımında $60,91 \pm 26,21$ ppb, çıkış akımında ise $13,15 \pm 3,14$ ppb olmuştur. Giriş akımında partikül fazdaki Cu konsantrasyonu $43,08 \pm 24,24$ ppb, çıkış akımında ise $6,24 \pm 3,64$ ppb'dir. Katı fazdaki Cu konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $9,12 \pm 3,91$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $1,96 \pm 0,44$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda ise $24,13 \pm 7,69$ mg/kg'dır (Şekil 4.32).

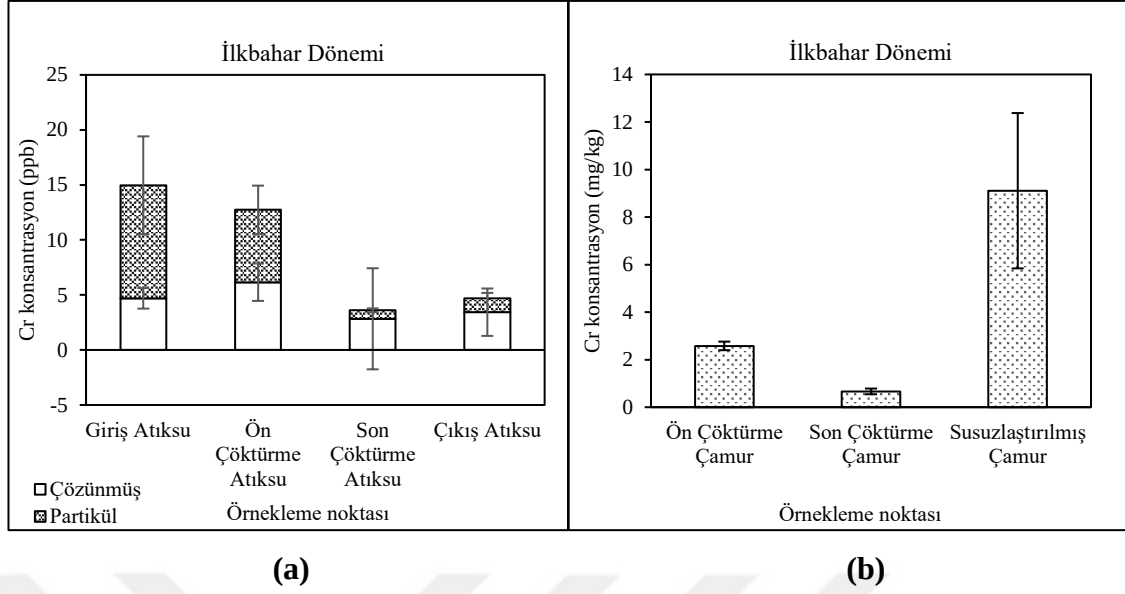


Şekil 4.31. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan As konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan As konsantrasyonu



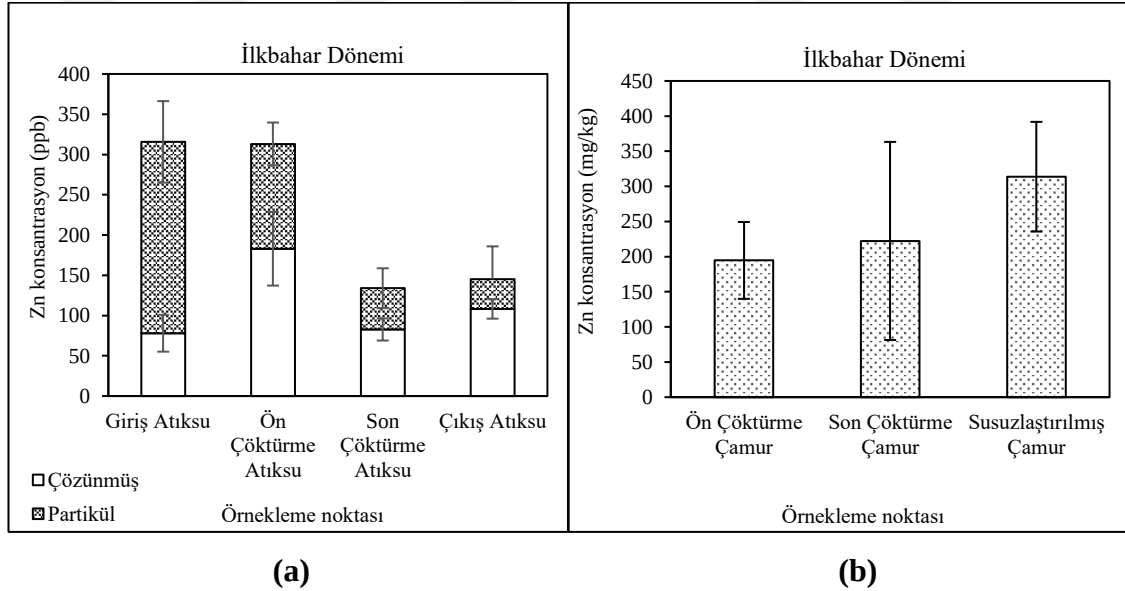
Şekil 4.32. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cu konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cu konsantrasyonu

Toplam Cr konsantrasyonu giriş akımında $14,97 \pm 4,00$ ppb, çıkış akımında $4,68 \pm 0,36$ ppb'dir. Çözünmüş fazdaki Cr konsantrasyonları ise giriş atıksuyunda $4,69 \pm 0,52$ ppb, ön çöktürme atıksuyunda $6,16 \pm 3,48$ ppb, son çöktürme atıksuyunda $2,83 \pm 0,21$ ppb ve çıkış atıksuyunda $3,43 \pm 0,19$ ppb olarak tespit edilmiştir. Katı fazdaki Cr konsantrasyonları ise ön çöktürme, son çöktürme ve susuzlaştırılmış çamurda sırasıyla, $2,58 \pm 0,18$ mg/kg; $0,67 \pm 0,12$ mg/kg; $9,11 \pm 3,27$ mg/kg'dır (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Cr konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Cr konsantrasyonu

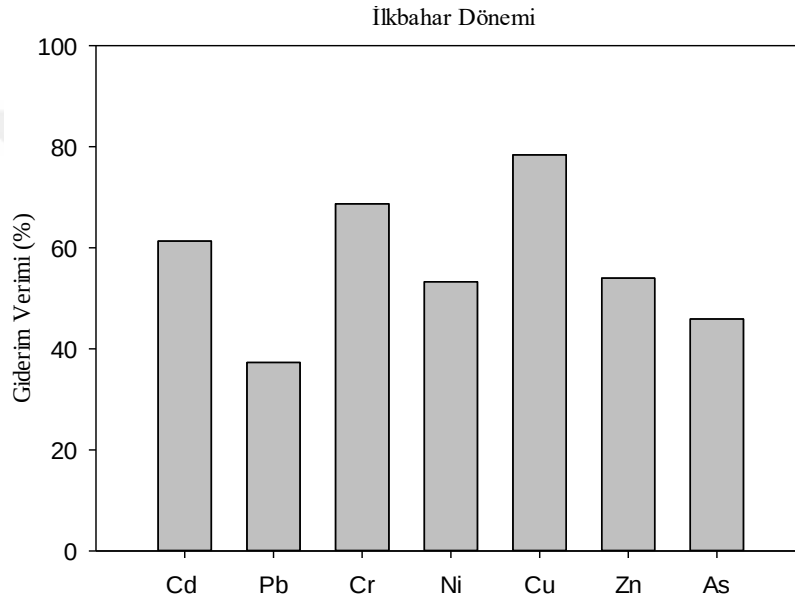
İlkbahar dönemi Zn konsantrasyonu giriş akımında toplam $315,67 \pm 58,62$ ppb, çözülmüş fazda $78,00 \pm 22,89$ ppb'dir. Çıkış akımındaki Zn konsantrasyonu ise toplam $145,20 \pm 31,01$ ppb, çözülmüş fazda $108,22 \pm 12,13$ ppb'dir. Katı fazdaki Zn konsantrasyonu ön çöktürme çamurunda $194,62 \pm 54,70$ mg/kg, son çöktürme çamurunda $222,30 \pm 140,94$ mg/kg ve susuzlaştırılmış çamurda $313,75 \pm 78,01$ mg/kg'dır (Şekil 4.34).



Şekil 4.34. (a) Arıtma aşamalarındaki sıvı fazda bulunan Zn konsantrasyonu ve faz dağılımı; **(b)** Arıtma aşamalarındaki katı fazda bulunan Zn konsantrasyonu

4.2.8. İlkbahar dönemi ağır metal giderim verimi

En yüksek ağır metal giderimi Cu (%78)'da görülmüştür. Cr, Cd, Zn, Ni, As ve Pb'nin giderim verimleri ise sırasıyla %69, %61 %54, %53, %46 ve %37 olmuştur. Diğer örnekleme dönemlerine göre giderim verimleri düşük olmuştur. Fakat, bu metallerde birkaç istisna haricinde giriş partikül fazı yüksek olan metallerde giderim yüksek olmuş ve çıkış suyundaki çözünmüş fazda artış gözlenmiştir. Cu, en yüksek giderim verimine sahip olmasına karşın çıkış konsantrasyonunda Zn ve Ni 'den sonra 3. sırada en yüksek metaldir. As'de düşük giderim verimine sahip olmasına rağmen çıkış konsantrasyonu en düşük metaldir. Hg ilkbahar dönemi atıksuyu verileri yok denilecek kadar az, tespit limitinin altında bulunduğu için bir giderim verimi hesaplanamamıştır. İlkbahar dönemindeki ağır metallerin giderim verimleri Şekil 4.35'de verilmiştir.



Şekil 4.35. Hurma AAT'de ilkbahar dönemi ağır metal giderimi

5. TARTIŞMA

5.1. Sıvı Fazdaki Metallerin Mevsimsel Karşılaştırması

Ham sudaki metallerin varlığı tesisin bulunduğu bölgedeki tesise gelen kaynaklara bağlıdır (Carletti vd., 2008). Bu sebeple literatürde incelenen sonuçlara göre arıtma tesislerindeki ağır metal konsantrasyonlarında farklılıklar görülmüştür. Bu çalışmada ağır metallerin bir yıl boyunca mevsimsel değişimleri izlenmiştir ve mevsimsel olarak bile tesise gelen metal konsantrasyonları arasında farklılıklar mevcuttur. Çizelge 5.1’de her mevsim dönemine ait metallerin giriş-çıkış konsantrasyonları giderim verimi ve yıllık yükleri mevcuttur. Mevsimsel konsantrasyonlar, mevsim döneminde alınan örnekleme günlerinin ortalama konsantrasyonuna göre belirlenmiştir.

İlkbahar dönemi verilerine göre ham sudaki metallerin nispi bolluğu $Hg < As < Pb < Cd < Cr < Cu < Ni < Zn$, yaz döneminde $Hg \approx Ni < As < Cd < Cu < Cr < Pb < Zn$, sonbahar döneminde $Cd < As < Cr < Ni < Cu < Hg < Zn < Pb$ şeklinde, kış döneminde ise $As < Hg < Cr < Ni < Cu < Cd < Pb < Zn$ şeklinde olmuştur. Bu farklılıkların sebebi tesise gelen kaynakların mevsimsel olarak farklılık göstermesi olabilir. Fakat sonbahar dönemi haricinde tesise gelen en yüksek metal konsantrasyonu Zn olurken, en düşük metal konsantrasyonları Hg ve As olmuştur. Ayrıca yaz dönemindeki metal konsantrasyonları diğer dönemlere göre oldukça düşük olmuştur. Kış dönemindeki metal konsantrasyonları da birkaç istisna dışında diğer dönemlere göre yüksek olmuştur. Kış dönemindeki konsantrasyonlarının yüksek yaz dönemindeki konsantrasyonlarının düşük olmasının sebebi, yaz döneminde turizm sezonunun açılması ile artan nüfus ile artan su tüketimine bağlı seyrelmeden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu durum, yaz döneminde, yağışın daha az olmasına bağlı yüzeysel akışın azalmasından kaynaklı da olabilir. Yaz dönemindeki tesise gelen en yüksek metal konsantrasyonu Zn için $25,46 \pm 11,38$ ppb olurken kış dönemindeki Zn konsantrasyonu $432,80 \pm 35,40$ ppb olmuştur. Pb konsantrasyonu ilkbahar ve yaz döneminde (sırasıyla $7,82 \pm 8,70$ ve $8,60 \pm 0,15$ ppb) birbirine yakın ve düşük konsantrasyonlarda görülürken sonbahar ve kış döneminde (sırasıyla, $180,84 \pm 52,91$ ve $272,68 \pm 357,93$ ppb) yüksek konsantrasyonlarda görülmüştür. Sonbahar ve kış dönemindeki yüksek konsantrasyonun sebebi su borularında ve tesisatlarda kullanılan Pb’nin atıksuya karışmasından kaynaklı olabilir. Ayrıca sonbahar döneminde diğer dönemlere göre Hg için ($42,14 \pm 5,20$ ppb) oldukça yüksek bir giriş olmuştur, benzer şekilde kış döneminde de Cd konsantrasyonu ($50,57 \pm 11,03$ ppb) diğer dönemlere göre oldukça yüksek tespit edilmiştir. Bu metallerdeki yüksek konsantrasyonların sebebi Çanakçı ve Akıncı (2009)’nın yapmış olduğu çalışmaya göre Antalya’da tarımdaki ilaçlama ve gübreleme aylarının örnekleme zamanlarımızı kapsamamasından kaynaklı olabileceği gibi dönemlik başka bir kaynaktan olabilir. Ayrıca Pb, Hg ve Cd’deki bu dönemsel artışlar o dönemlerde kaçak deşarj yapılmış olmasına bir işaret olabilir.

Her mevsim döneminde giriş konsantrasyonunda olduğu gibi çıkış konsantrasyonunda da en yüksek metal Zn’dir. Fakat yüksek konsantrasyonda olsa da Zn giderim verimi yaz dönemi (%2) haricinde %54-79 arasında gerçekleşmiştir. İlkbahar dönemi çıkış konsantrasyonu $Hg < As < Cd < Cr < Pb < Cu < Ni < Zn$, şeklinde, yaz döneminde $Hg \approx Ni \approx As < Cu < Cd < Cr < Pb < Zn$, sonbahar döneminde $Cd < Cr < As < Cu < Ni < Pb < Hg < Zn$ ve kış döneminde $Hg < As < Cr < Ni < Cu < Cd < Pb < Zn$ şeklinde olmuştur. İlkbahar dönemindeki yüksek konsantrasyonda giren Hg çıkış konsantrasyonunu da etkilemiştir.

İlkbahar dönemi dışındaki diğer dönemlerde Hg konsantrasyonu çıkış atıksuyunda en düşük konsantrasyonda ve genel olarak tespit limitinin altında gözlenmiştir. Ayrıca kış dönemindeki giriş konsantrasyonu yüksek olan Cd konsantrasyonu çıkışta da diğer dönemlerden yüksek olmuş ve giderim verimi de (%10) en düşük dönemdir. As'nin sonbahar döneminde çıkış konsantrasyonu giriş konsantrasyonundan yüksek olmuştur ve bu sebeple bir giderim gerçekleşmemiştir. Bu durum katı fazdan taşımadan kaynaklı olabilir.

Tüm mevsim dönemlerinde genel olarak en yüksek ve en tutarlı giderim verimleri Cr ve Cu olmuştur. Cu için %71-99, Cr için giderim verimi %60-96 arasında değişmiştir. Yaz döneminde As, sonbahar döneminde Cd, Kış döneminde Hg çıkış suyunda tespit limitinin altında bulunduğu için en yüksek giderim verimleri (% ~100) görülmüştür. Ni' de de tüm mevsimlerde tutarlı giderim verimi (%42-58) gözlenmiştir. En düşük Zn giderimi (%2) yaz döneminde gerçekleşmiştir, fakat en düşük Zn konsantrasyonu da ($24,86 \pm 2,70$ ppb) yaz döneminde tespit edilmiştir. AAT'lerde atıksudaki metallerin bir kısmının hidroksit olarak çöküp atıksudan giderildiği için metal giderim veriminde pH'ın önemi büyüktür. Fakat metallerin çökme pH aralığının farklı olması metallerin giderim verimindeki bu farklılıkların bir sebebi olabilir.

Hurma atıksu arıtma tesisine organize sanayi bölgesinde arıtılan sular da gelmektedir. Bu sanayi bölgelerinin SKKY'de kanalizasyona ağır metal deşarj limitleri mevcuttur. Ham su verilere bakıldığında tesise gelen atıksu konsantrasyonları bu limitlerin altında olduğu için sanayi bölgesinden gelen atıksuların bu limit değerlere uygun deşarj yaptığı anlaşılmaktadır (Ek- 7) Ek olarak tesise gelen yüksek debi ile seyrelmenin etkisi de mevcuttur.

Ek-14'de verilen geri kazanılmış evsel atıksuların tahmini eser madde konsantrasyonlarının limit değerlerine göre Hurma AAT buradaki üçüncül arıtma verileriyle kıyaslandığında As ilkbahar ve sonbahar döneminde, Cd ilkbahar ve kış döneminde, Cu ilkbahar ve kış döneminde çok az, Hg sonbahar döneminde, Pb tüm mevsim dönemlerinde ve Zn ilkbahar ve kış döneminde bu değerlerin üzerinde olmuştur. Ayrıca Ek-13'de verilen her türlü zemine sürekli sulama yapılması durumunda uygulanan limit değerlere göre Cd'nin kış dönemi haricinde tüm metaller limit değerlerinin altındadır. Ni ve Hg için bir limit değer belirlenmediği için bir değerlendirme yapılamamıştır. EK-1'de verilen EC166/2006 sayılı yönergede yer alan kirleticilerin çevreye salınım limitlerine göre tesisin çıkış suyu değerleri kg/ yıl bazında suya salınım limitlerinin çok üzerindedir (limit değerler; As için 5 kg/yıl, Cd için 5 kg/yıl, Cr için 50 kg/yıl, Cu için 50 kg/yıl, Hg için 1 kg/yıl, Ni için 20 kg/yıl, Pb için 20 kg/yıl ve Zn için 100 kg/yıl). Bu limit değerler sadece Cd yaz ve sonbahar döneminde, Hg ilkbahar, yaz ve kış döneminde, Ni, As, Cu ve Cr de yaz döneminde karşılamaktadır. Bu sebeple arıtma tesislerinin Avrupa standartlarını karşılayabilmesi için ağır metal giderimi için iyon değişimi, kimyasal çöktürme, adsorpsiyon gibi arıtım yöntemleri kullanılabilir.

Çizelge 5.1. Sıvı fazdaki metallerin mevsimsel karşılaştırması

Metaller	İlkbahar				Yaz				Sonbahar				Kış			
	Giriş kons. (ppb)	Çıkış kons. (ppb)	Yıllık deşarj edilen yük (kg/yıl)	Verim (%)	Giriş kons. (ppb)	Çıkış kons. (ppb)	Yıllık deşarj edilen yük (kg/yıl)	Verim (%)	Giriş kons. (ppb)	Çıkış kons. (ppb)	Yıllık deşarj edilen yük (kg/yıl)	Verim (%)	Giriş kons. (ppb)	Çıkış kons. (ppb)	Yıllık deşarj edilen yük (kg/yıl)	Verim (%)
Cd	9,66 ± 6,06	3,73 ± 0,99	260,44	61	0,12 ± 0,004	0,07 ± 0,06	4,32	41	2,96 ± 2,84	TLA	TLA	~100	50,57 ± 11,03	45,30 ± 21,80	3231,26	10
Hg	TLA	TLA	TLA	-	TLA	TLA	TLA	-	42,14 ± 5,20	15,22 ± 1,25	918,19	64	1,09 ± 1,54	TLA	TLA	~100
Ni	41,44 ± 32,87	19,36 ± 7,31	1350,28	53	TLA	TLA	TLA	-	16,96 ± 7,07	9,86 ± 2,91	594,71	42	19,80 ± 6,37	8,37 ± 3,17	597,37	58
Pb	7,82 ± 8,70	4,90 ± 1,68	342,02	37	8,60 ± 0,15	3,20 ± 1,36	194,12	63	180,84 ± 52,91	15,00 ± 13,63	904,54	92	272,68 ± 357,93	86,17 ± 64,59	6147,37	68
As	4,04 ± 1,93	2,18 ± 0,34	169,02	46	0,07 ± 0,07	TLA	TLA	~100	5,548 ± 2,98	5,553 ± 1,27	334,91	-	0,78 ± 0,55	0,58 ± 0,43	41,45	25
Cu	60,91 ± 26,21	13,15 ± 3,14	916,95	78	2,08 ± 0,79	0,03 ± 0,03	1,70	99	23,65 ± 2,51	5,56 ± 2,04	335,59	76	39,54 ± 12,21	11,56 ± 5,24	825,17	71
Cr	14,97 ± 4,00	4,68 ± 0,36	326,46	69	2,85 ± 2,39	0,11 ± 0,05	6,53	96	6,94 ± 1,51	2,76 ± 0,08	166,67	60	12,11 ± 3,66	3,12 ± 0,88	222,87	74
Zn	315,67 ± 58,62	145,20 ± 31,01	10126,72	54	25,46 ± 11,38	24,86 ± 2,70	1505,85	2	162,66 ± 11,70	47,22 ± 4,78	2847,97	71	432,80 ± 35,40	88,51 ± 19,91	6292,91	80

TLA:Tespit Limiti Altı

5.2. Sıvı Fazdaki Metallerin Literatür Karşılaştırılması

Çizelge 5.2’de literatürde incelenen metallerin arıtma tesisi giriş - çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri ile bizim çalışmamızdaki yıllık ortalama sonuçların kıyaslaması verilmiştir. İncelenen çalışmalarda her metal için farklı sonuçlar görülmüştür. Hatta aynı ülke içerisinde ve hatta aynı şehirde bile farklılıklar görülmektedir. Salihoglu (2013)’nın incelediği Bursa’daki iki arıtma tesisindeki farklılıkların sebebini tesise gelen kaynaklara bağlamışlardır, mesela Doğu AAT’deki yüksek Cr seviyesinin drenaj havzasının sınırlarında yer alan otomotiv, metal ve makine sanayilerinden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.

Literatürde, As ve Hg metalleri diğer metallere göre daha az incelenmemiştir. Bu sebeple genel bir tespitte bulunmak için veri yetersizdir, fakat bu çalışmada elde ettiğimiz yıllık ortalama sonuçlara göre As giriş konsantrasyonu Salihoglu (2013)’nın çalışması haricinde Buseti vd. (2005) ve Goldstone vd. (1990a, b, c)’nin sonuçlarıyla benzer aralıkta görülmüştür. Antalya ili Bursa gibi bir sanayi şehri olmadığı için tesise daha düşük konsantrasyonlarda As gelse de toksisitesi yüksek olan metallerden biri olduğu için düşük konsantrasyonlarda da dikkate değerdir. Çıkış konsantrasyonunda ise Bursa dışındaki diğer çalışmalarla benzer olsa da giderim verimi literatürden düşük olmuştur. Buseti vd. (2005) ve Goldstone vd. (1990a, b, c)’nin sırasıyla %77, %81 yüksek giderim verimine sahip olan As bu çalışmada %24 olmuştur. Benzer şekilde literatürde az sayıda çalışmada incelenen bir diğer metal olan Hg’de de bu çalışmada literatürden fazla çıkmıştır. Bunun sebebi sonbahardaki yüksek Hg girişinin olmasıdır. Bu durum çıkış konsantrasyonunu da etkilemiş ve literatürden yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Sonbahar döneminde tesise giren bu yüksek konsantrasyonun sebebi bir önceki bölümde de açıklandığı gibi tarımsal faaliyetlerden kaynaklı olabilir. Giderim verimi incelenen literatür verilerinde %90’dan fazla iken bu çalışmada %65 olmuştur.

Birçok çalışmada tesise gelen en düşük metal konsantrasyonundaki metal Cd olmuştur ve literatürde incelenen çalışmalarda Cd metal konsantrasyonları 0,15 ile 20 ppb arasında görülmüştür. Bu çalışmada verilerinde de Cd konsantrasyonu literatür verilerinin birçoğundan yüksek olarak $18,69 \pm 23,50$ ppb olarak tespit edilmiştir. Birçok fosfat gübresinin Cd içerdiği bilindiği için bu çalışmadaki Cd konsantrasyonun literatür verilerine göre yüksek olmasının sebebi fosfatlı gübre kullanımından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, çıkış konsantrasyonunda da Cd konsantrasyonu incelenen literatür çalışmalarına göre yüksek olmuştur. Literatür verilerine göre Cd giderimi oldukça değişken olmuştur. Bu çalışmadaki giderim verimi (%21) diğer çalışmalara göre düşük olmakla birlikte Chipasa (2003)’nın yapmış olduğu çalışmadaki giderim verimine (%10-20) benzer şekilde gerçekleşmiştir.

Bu çalışmadaki Cr giriş - çıkış konsantrasyonları ve giderim verimi Buzier vd. (2006)’nin çalışmasına çok benzer şekilde olmuştur. Giriş atıksuyundaki Cr konsantrasyonu $10,08 \pm 5,89$ ppb, çıkış konsantrasyonu $2,91 \pm 1,67$ ppb’dir. Ayrıca, birkaç istisna dışında Cr giderim verimi %71-87 arasında yüksek gerçekleşmiştir. Bu çalışmada da giderim verimi %71 olmuştur.

Ni konsantrasyonu literatür verilerine göre oldukça değişkendir. Karvelas vd. (2003)’nin çalışmasında Ni giriş konsantrasyonu (770 ± 200 ppb) diğer çalışmalara göre çok yüksek olurken bizim çalışmamızda Buseti vd. (2005)’nin (1-39 ppb) ve Buzier vd.

(2006)'nin (10-12,5 ppb) verilerine yakın olarak $21,77 \pm 25,01$ ppb tespit edilmiştir. Tesisteki çıkış Ni konsantrasyonu literatüre yakın ve düşük olmuştur. Cantinho vd. (2016)'nin çalışmasında literatürdeki en uyumlu metal gideriminin Ni' de (%40-60 aralığında) olduğunu tespit etmiştir. Bizim çalışmamamızdaki Ni giderimi de bu duruma benzer olup giderim verimi %53 olmuştur.

Pb ortalama giriş konsantrasyonu $122,04 \pm 211,29$ ppb'dir. Literatürde, Goldstone vd. (1990a, b, c)'nin çalışması dışındaki çalışmalarda Pb konsantrasyonu daha düşük konsantrasyonlardadır. Goldstone vd. (1990a, b, c), bu yüksek Pb konsantrasyonunu yol akışlarından ve daha çok da endüstriyel kaynaklardan olabileceği düşünülmüştür. Giriş konsantrasyonu yüksek olmasına karşın çıkış konsantrasyon verileri literatürdeki sonuçlara benzer şekilde $30,87 \pm 46,86$ ppb olmuştur. Giderim verimi %75 ile yüksek gerçekleşmiştir. Fakat literatürde %30'larda düşük giderim verimlerinin yanı sıra %90'ın üzerinde giderim verimleri de mevcuttur.

Yıllık ortalama Cu giriş konsantrasyonu $35,28 \pm 27,93$ ppb, çıkış konsantrasyonu $8,91 \pm 6,12$ ppb olmuştur. Literatürdeki incelenen çalışmalardaki bakır giriş konsantrasyonu 5-300 ppb şeklinde geniş bir aralığa sahiptir. Literatürdeki giderim verimleri %50 ile 93 arasında gerçekleşmiştir. Bu çalışmadaki giderim verimi de Pb gibi %75 olarak kayda değer bir giderim gerçekleşmiştir.

Tesise gelen Zn konsantrasyonu bu çalışmada da ve literatürde genel olarak yüksek konsantrasyonlarda görülmüştür. Bu çalışmadaki Zn giriş konsantrasyonu $262,17 \pm 164,11$ ppb iken çıkış konsantrasyonu $81,21 \pm 50,12$ ppb olmuştur. Goldstone vd. (1990a, b, c)'nin yapmış olduğu çalışmadaki giriş – çıkış konsantrasyon aralığına benzer olmuştur. Goldstone vd. (1990a, b, c)'nin giderim verimi %61 gerçekleşirken bu çalışmada %69 ile çok az yüksek olmuştur. Genel olarak literatür sonuçlarında giriş – çıkış konsantrasyon değerleri oldukça değişkendir.

Genel olarak, yıllık ortalama ham sudaki metal konsantrasyonlarının nispi bolluğu $As < Hg < Cr < Cd < Ni < Cu < Pb < Zn$ şeklinde olmuştur. Benzer şekilde Oliveira vd. (2007)'nin yapmış olduğu çalışmada da sıralama $Hg < Cd < Cr < Cu < Pb < Zn$ benzer olarak sadece Cd ve Cr yer değiştirmiştir. Aynı şekilde Chipasa (2003)'nin çalışmasında da Zn en yüksek konsantrasyonda olmuştur. Zn'nin ve Pb'nin yüksek konsantrasyonlarda bulunmasının Antalya şehrinin tarım kenti olmasından dolayı Zn için gübre kullanımından, Pb için pestisit kullanımıyla ilgili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yüksek Zn içeriğinin hem evsel kaynaklı atıksularda bulunmasından hem de çevredeki küçük ölçekli metal sanayilerinin olmasından kaynaklı olabilir. Pb'nin de su borularında ve tesisatlarda kullanılan Pb'nin atıksuya karışmasından kaynaklı olarak yüksek konsantrasyonda olmalarının bir diğer açıklaması olabilir. Ayrıca Goldstone vd. (1990a, b, c)'nin yapmış olduğu açıklama gibi Pb konsantrasyonundaki yüksek konsantrasyon yüzey akışı ya da sanayiden kaynaklı da olabilir.

Yıllık ortalama çıkış akımındaki metal konsantrasyonlarındaki nispi bolluk: $As < Cr < Hg < Ni < Cu < Cd < Pb < Zn$ şeklinde olmuştur. En yüksek metal konsantrasyonu en yüksek Zn olurken en düşük metal konsantrasyonu As de görülmüştür. Fakat, Zn ve bileşikleri diğer metallere göre daha düşük toksik etkiye sahipken As düşük konsantrasyonlarda bile toksisitesi yüksek metallerdendir. Bu çalışmada Hurma AAT'de giderim verimi en düşük Cd ve As 'de (sırasıyla %21, %24), en yüksek ise Cu, Pb ve

Cr’de (sırasıyla %75, %75, %71) gerçekleşmiştir. Salihoglu (2013)’nun yapmış olduğu çalışmadaki her iki tesiste de en düşük giderim verimleri bu çalışmada olduğu gibi As, Cd ve Ni’ de gerçekleşmiştir. Sonuç olarak tüm çalışmalar karşılaştırıldığında farklı ülkelerdeki çalışmaların yanı sıra Salihoglu (2013)’nun Bursa ilinde yapmış olduğu çalışmada da hem giriş ve çıkış konsantrasyonu hem de giderim verimlerinde farklılıklar görülmüştür. Hatta Salihoglu (2013)’nun kendi çalışmasında bursa ilindeki iki farklı AAT incelemiştir ve her iki tesiste farklı sonuçlar elde etmiştir. Ham sudaki farklılıkların ana nedeni yukarıda da bahsettiğimiz gibi çoğunlukla arıtma tesisine gelen kaynakların etkisidir ve AAT ham su metal konsantrasyonu için bir genelleme yapmak zordur. Ayrıca, metal konsantrasyonlarını ölçmek için kullanılan analitik tekniklerdeki farklılıklar ve çalışma koşulları tüm aşamalarda belirlenen metal konsantrasyonlarındaki sonuçların farklı olmasının nedeni olabilir, aynı şekilde bu durum literatürdeki aynı metal için olan giderim verimindeki giderim verimindeki farklılıkların da sebep olabilir (Cantinho vd., 2016). Bunlara ek olarak, literatürde SRT, MLSS gibi tesisin işletim koşulları hakkındaki bilgilerin eksikliği sebebiyle bir karşılaştırma yapması zor olmakla birlikte bu koşullardaki farklılıklar ve bazı tesislerde eklenen koagülanlar farklı giderim verimlerinin ortaya çıkmasında bir etken olabilir. Antalya verilerinin Bursa verilerinden farklı olmasının ana sebebi Bursa kentinin sanayi şehri Antalya’nın tarım ve turizm kenti olmasıdır.

Çizelge 5.2. Sıvı fazdaki metallerin literatür karşılaştırması

Metaller	Ülke	Giriş kons. (ppb)	Çıkış kons. (ppb)	Giderim verimi (%)	Referans
As	İtalya	0,3-31	0,5-9,2	77 ±3	Busetti vd. (2005)
	Norveç	11-12,6	2-2,5	81	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	105	44	48	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Bursa) (Batı AAT)	78	28	47	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Antalya)	2,70 ±3,03	2,05 ±2,10	24	Bu çalışma
Cd	Polonya	10-20		10-20	Chipasa, (2003)
	Yunanistan	3,3 ±1,1	1,5 ±0,74	55	Karvelas vd., (2003)
	İtalya	0,2-1,8	0,1-1,6	85 ±2	Busetti vd. (2005)
	Brezilya	0,15 ±0,21	0,06 ±0,02	60	Oliveira vd., (2007)
	Norveç	1,5-2,0	0,25-0,5	79	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Fransa	0,6	<0,2	≥67	Buzier vd. (2006)
	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	18	7	46	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Bursa) (Batı AAT)	7	5	36	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Antalya)	18,69 ±23,50	14,71 ±21,36	21	Bu çalışma

Çizelge 5.2'nin devamı

Metaller	Ülke	Giriş kons. (ppb)	Çıkış kons. (ppb)	Giderim verimi (%)	Referans
Cr	Yunanistan	40 ±12	20 ±4	50	Karvelas vd., (2003)
	İtalya	0,5-18,4	0,4-8,2	87 ±1	Busetti vd. (2005)
	Brezilya	6,87 ±3,73	5,74 ±2,83	16,5	Oliveira vd., (2007)
	Norveç	35	10	71	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Fransa	9	2-3	72	Buzier vd. (2006)
	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	456	35	83	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Bursa) (Batı AAT)	147	22	78	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Antalya)	10,08 ±5,89	2,91 ±1,67	71	Bu çalışma
Hg	İtalya	0,2-147	0,1-9,5	93 ±1	Busetti vd. (2005)
	Brezilya	0,13 ±0,09	0,05 ±0,07	61,5	Oliveira vd., (2007)
	Norveç	2,5	0,25	90	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Türkiye (Antalya)	8,79 ±17,78	3,04 ±6,12	65	Bu çalışma
Ni	Yunanistan	770 ±200	430 ±97	44	Karvelas vd., (2003)
	İtalya	1-39	1-65	50 ±3	Busetti vd. (2005)
	Norveç	40	20-25	44	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Fransa	10-12,5	11-12,5	-4	Buzier vd. (2006)
	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	77	44	42	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Bursa) Batı AAT)	66	33	44	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Antalya)	21,77 ±25,01	10,29 ±8,23	53	Bu çalışma

Çizelge 5.2'nin devamı

Metaller	Ülke	Giriş kons. (ppb)	Çıkış kons. (ppb)	Giderim verimi (%)	Referans
Pb	Polonya	~50		30-40	Chipasa, (2003)
	Yunanistan	39 ±9,4	27 ±3,6	31	Karvelas vd., (2003)
	İtalya	1,0-64	1,0-11	92 ±1	Busetti vd. (2005)
	Brezilya	37,42 ±59,67	22,57 ±20,72	39,7	Oliveira vd., (2007)
	Norveç	600	25	96	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Fransa	17,5-20	<1	≥95	Buzier vd. (2006)
	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	87	26	61	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Bursa) (Batı AAT)	49	25	51	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Antalya)	122,04 ±211,29	30,87 ±46,86	75	Bu çalışma
Cu	Polonya	~100		50-60	Chipasa, (2003)
	Yunanistan	79 ±35	33 ±5	58	Karvelas vd., (2003)
	İtalya	5-430	3-90	93 ±1	Busetti vd. (2005)
	Brezilya	17,31 ±4,93	9,66 ±4,86	44,2	Oliveira vd., (2007)
	Norveç	250-300	50-75	77	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Fransa	60-65	5-10	88	Buzier vd. (2006)
	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	48	13	75	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Bursa) (Batı AAT)	51	12	77	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Antalya)	35,28 ±27,93	8,91 ±6,12	75	Bu çalışma
Zn	Polonya	450-500		80-90	Chipasa, (2003)
	Yunanistan	470 ±140	270 ±53	43	Karvelas vd., (2003)
	İtalya	61-833	24-238	75 ±3	Busetti vd. (2005)
	Brezilya	79,20 ±41,06	43,64 ±13,44	44,9	Oliveira vd., (2007)
	Norveç	275-300	100-125	61	Goldstone vd. (1990a, b, c)
	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	405	161	57	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Bursa) (Batı AAT)	1266	28	47	Salihoglu (2013)
	Türkiye (Antalya)	262,17 ±164,11	81,21 ±50,12	69	Bu çalışma

5.3. Katı Fazdaki Metallerin Mevsimsel Karşılaştırılması

Her mevsim dönemine ait metallerin katı fazdaki konsantrasyonları Çizelge 5.3’de verilmiştir. Mevsimsel konsantrasyonlar, mevsim döneminde alınan örnekleme günlerinin ortalama konsantrasyonuna göre belirlenmiştir.

Tüm mevsim dönemlerinde çamur numunelerindeki en yüksek metal konsantrasyonu Zn olmuştur. Ön çöktürme çamurundaki Zn konsantrasyonu, ilkbahar döneminde $6769,17 \pm 1584,96$, yaz döneminde $94,51 \pm 8,21$, son bahar döneminde $1191,01 \pm 249,76$ ve kış döneminde $2683,78 \pm 1466,24$ mg/kg KM şeklinde görülmüştür. En yüksek konsantrasyon ilkbahar döneminde, en düşük konsantrasyon yaz döneminde tespit edilmiştir. Ayrıca, yaz dönemindeki metal konsantrasyonları da (Pb hariç) diğer mevsim dönemlerden düşük olmuştur. Bunun sebebi yaz döneminde tesise gelen atıksudaki metal konsantrasyonlarının daha düşük olmasından kaynaklı olabilir. Kış dönemi ve ilkbahar döneminde ön çöktürme çamurundaki metallerin nispi bolluğu $Hg < As < Cd < Pb < Ni < Cr < Cu < Zn$ şeklinde aynı olmuştur. Yaz ve sonbahar döneminde de en yüksek metallerin nispi bolluğu benzer şekilde olmuştur. Yaz dönemindeki metallerin nispi bolluğu $Hg = Ni = As < Cd < Cr < Cu < Pb < Zn$, sonbahar döneminde $As < Ni < Hg < Cr < Cd < Cu < Pb < Zn$ şeklinde olmuştur. Ayrıca yaz döneminde Hg, Ni ve As, ilkbahar döneminde sadece Hg tespit limitinin altında tespit edilmiştir. Ön çöktürme çamurunda en düşük metal konsantrasyonu ilkbahar, yaz ve kış döneminde Hg olmuştur ve konsantrasyonları ilkbahar ve yaz döneminde tespit limitinin altında, kış döneminde $2,44 \pm 3,46$ mg/kg KM şeklindedir. Ancak sonbahar döneminde diğer dönemlere göre tesise yüksek konsantrasyonda giren Hg, ön çöktürme çamurunda da diğer dönemlere göre yüksek konsantrasyonda ($46,17 \pm 12,76$ mg/kg KM) olmuştur. Sonbahar döneminde en düşük metal konsantrasyonu As’de ($11,02 \pm 2,74$ mg/kg KM) görülmüştür fakat diğer mevsim dönemlerine göre en yüksek As konsantrasyonu olmuştur. İlkbahar, yaz ve kış dönemindeki As konsantrasyonu sırasıyla $9,41 \pm 1,62$, $2,55 \pm 1,85$ mg/kg KM ve tespit limiti altındadır.

Ön çöktürme ve son çöktürme çamurunda Pb konsantrasyonu sonbahar döneminde diğer dönemlere göre oldukça fazla tespit edilmiştir. Son çöktürme çamurundaki Zn konsantrasyonu en yüksek ilkbahar döneminde $18285,17 \pm 9740,99$ mg/kg KM, en düşük yaz döneminde $85,81 \pm 13,49$ mg/kg KM olarak tespit edilmiştir. Ön çöktürme çamurunda olduğu gibi son çöktürme çamurunda da yaz döneminde Hg, Ni ve As, ilkbahar döneminde Hg tespit limitinin altında görülmüştür. Tüm mevsim dönemlerinde As, Ni ve Hg düşük konsantrasyonlardadır. En yüksek As ve Hg konsantrasyonu sonbahar döneminde, en yüksek Ni konsantrasyonu ilkbahar döneminde tespit edilmiştir.

Susuzlaştırılmış çamurda metallerin nispi bolluğu ilkbahar döneminde $Hg < Cd < As < Pb < Ni < Cr < Cu < Zn$, yaz döneminde $Hg < As < Cd < Ni < Cr < Cu < Pb < Zn$, sonbahar döneminde $Cd < Hg < As < Ni < Cr < Pb < Cu < Zn$ ve kış döneminde $As < Cd < Pb < Hg < Ni < Cr < Cu < Zn$ şeklinde olmuştur. Yaz döneminde Hg tüm aşamalarda tespit limitinin altında gerçekleşmiştir. İlkbahar döneminde $0,90 \pm 1,27$, sonbahar döneminde $1,37 \pm 0,42$ ve kış döneminde $3,84 \pm 5,43$ mg/kg KM olarak tespit edilmiştir. Tüm aşamalarda olduğu gibi yaz döneminde Pb konsantrasyonu haricindeki tüm metaller diğer mevsim dönemlerine göre düşük konsantrasyondadır. En yüksek Zn konsantrasyonu ilkbahar döneminde gerçekleşmiştir ve ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış

döneminde sırasıyla $1740,62 \pm 468,74$, $58,87 \pm 3,09$, $760,52 \pm 48,74$ ve $331,47 \pm 119,66$ şeklindedir. Zn'den sonra yaz dönemi haricinde en yüksek gelen Cu konsantrasyonu ilkbahar döneminde $133,75 \pm 43,87$, yaz döneminde $2,39 \pm 0,07$, sonbahar döneminde $119,37 \pm 6,87$ ve kış döneminde $26,12 \pm 10,27$ tespit edilmiştir.

Arıtma çamurunun tarımda kullanılmasına dair AB (Ek-3), ABD (Ek-4) ve ülkemizde (Ek-11) uygulanan limit değerlere göre tüm mevsim dönemlerinde susuzlaştırılmış çamur verileri bu limit değerlerinin altında tespit edilmiştir. Ancak, metallerin birçok mikrokirletici gibi birikim özelliği sebebiyle bu tür uygulamalar için daha ileri sistematik izleme çalışmalarının yapılması gerektiği düşünülmektedir.

5.4. Katı Fazdaki Metallerin Literatür Karşılaştırılması

Atıksu arıtma tesislerindeki ikinci son ürün çamurdur ve en sık kullanılan bertaraf yöntemlerinden biri de tarımsal kullanımıdır. Bu sebeple, çamurdaki metal konsantrasyonları da en az nihai çıkış suyundaki metal konsantrasyonu kadar önemlidir. Literatürde incelenen son çamurdaki metal konsantrasyonları ile bizim çalışmamızdaki yıllık ortalama sonuçlar ile kıyaslaması Çizelge 5.4'de verilmiştir. İncelenen çalışmalarda atıksu da olduğu gibi çamurda da her metal için farklı sonuçlar görülmüştür. Bunun sebebi atıksuda olduğu gibi tesise gelen metal konsantrasyonu, işletme koşulları ve arıtma performansı ile ilgili olabilir. Ayrıca, Hurma AAT'de çamur susuzlaştırmadan önce için polielektrolitler ilavesi yapılmaktadır. Bu yöntem işletme verimliliğini artırmak için birçok tesiste uygulanmaktadır fakat literatürde bu tarz işletme bilgileri eksiktir. Fakat bu tarz polielektrolit ilaveleri de susuz çamurdaki metal konsantrasyonlarındaki farklılıkların bir açıklaması olabilir.

Atıksuda olduğu gibi susuzlaştırılmış çamurda da As ve Hg konsantrasyonunun incelendiği çalışma oldukça azdır. Ancak, yakın tarihli bir literatür taraması, As, Be, Hg, Sn, Tl ve V için güvenlik seviyelerini belirleme tarımındaki çamur kullanımları konusundaki mevzuattan sorumlu makamlara acil bir ihtiyaç olduğunu göstermiştir (Oliveira vd., 2007). Oliveira vd., (2007)'nin yapmış olduğu çalışmada As konsantrasyonu, Salihoglu (2013) ve bizim çalışmamızdaki sonuçlara göre oldukça yüksek olarak 76 ± 66 mg/kg KM olarak tespit edilmiştir. Salihoglu (2013)'nin çalışmasında atıksu verileri bizim çalışmamıza göre oldukça yüksekken çamur verileri (Doğu AAT 0,85 Batı AAT 1,04 mg/kg KM) bizim çalışmamıza göre ($3,19$ mg/kg KM) kısmen düşük tespit edilmiştir. Susuzlaştırılmış çamurdaki yıllık ortalama en düşük metal konsantrasyonu Hg ve daha sonra Cd olmuştur. İncelenen literatür verilerinde de metal konsantrasyonu en düşük metal Cd olarak görülmüş ve konsantrasyonu $0,09-10$ mg/kg KM aralığında değişmektedir. Atıksu giriş konsantrasyonunda bu sonuçlar tam tersi olarak en yüksek metal birçok çalışmada Cd olmuştur.

Cr konsantrasyonu literatürde oldukça değişken olmuştur. Scancar vd. (2000) (856 ± 259 mg/kg KM), Alvarez vd. (2002) ($54,4-439$ mg/kg KM) ve Karvelas vd. (2003)'nin (370 ± 100) çalışmasında oldukça yüksek konsantrasyonlarda görülürken en düşük konsantrasyonlar Salihoglu (2013)'nin çalışmasında (Doğu AAT için 0,81 Batı AAT için 0,85) gerçekleşmiştir. Bizim çalışmamızda ise Chipasa (2003)'nin verilerine (6-22) yakın olarak $28,30$ tespit edilmiştir. Benzer şekilde Ni konsantrasyonunda da sonuçlar oldukça değişkendir. Oliveira vd., (2007), Scancar vd. (2000) ve Karvelas vd. (2003) çalışmalarında sırasıyla 852 ± 1693 ; 621 ± 187 ve 300 ± 76 olarak yüksek

Çizelge 5.3. Katı fazdaki metallerin mevsimsel karşılaştırılması

Metaller	İlkbahar			Yaz			Sonbahar			Kış		
	ÖÇÇ (mg/kg KM)	SÇÇ (mg/kg KM)	SÇ (mg/kg KM)	ÖÇÇ (mg/kg KM)	SÇÇ (mg/kg KM)	SÇ (mg/kg KM)	ÖÇÇ (mg/kg KM)	SÇÇ (mg/kg KM)	SÇ (mg/kg KM)	ÖÇÇ (mg/kg KM)	SÇÇ (mg/kg KM)	SÇ (mg/kg KM)
Cd	12,24 ±0,29	24,87 ±2,95	4,96 ±1,59	0,41 ±0,02	0,27 ±0,03	0,27 ±0,004	70,42 ±13,88	19,78 ±14,77	1,36 ±0,51	6,98 ±2,08	14,27 ±2,56	1,12 ±0,59
Hg	TLA	TLA	0,90 ±1,27	TLA	TLA	TLA	46,17 ±12,76	24,78 ±16,87	1,37 ±0,42	2,44 ±3,46	10,35 ±14,63	3,84 ±5,43
Ni	77,02 ±3,12	53,30 ±12,85	34,36 ±11,82	TLA	TLA	0,72 ±0,03	34,09 ±8,76	42,48 ±8,29	35,82 ±2,82	54,67 ±15,08	44,65 ±13,36	7,51 ±2,84
Pb	35,39 ±8,92	18,10 ±10,39	18,67 ±5,07	90,39 ±14,87	33,15 ±16,53	16,75 ±1,14	299,52 ±55,57	247,63 ±103,37	46,36 ±1,50	38,98 ±44,29	15,80 ±13,60	2,12 ±1,98
As	9,41 ±1,62	5,86 ±2,79	6,57 ±2,67	TLA	TLA	0,14 ±0,002	11,02 ±2,74	9,78 ±2,79	5,23 ±0,26	2,55 ±1,85	0,45 ±0,32	0,57 ±0,40
Cu	315,98 ±121,87	174,254 ±45,03	133,75 ±43,87	8,028 ±0,78	3,44 ±0,30	4,70 ±0,46	143,42 ±24,71	149,46 ± 12,90	119,37 ±6,87	251,83 ±64,85	136,82 ±30,94	26,12 ±10,27
Cr	90,61 ±2,33	59,01 ±11,88	50,44 ±18,18	2,87 ±0,48	1,55 ±0,65	2,39 ±0,07	47,06 ±10,62	36,11 ±1,65	40,38 ±2,73	66,02 ±14,62	39,47 ±10,97	12,48 ±1,99
Zn	6769,17 ±1584,96	18285,17 ±9740,99	1740,62 ±468,74	94,51 ±8,21	85,81 ±13,49	58,87 ±3,09	1191,01 ±249,76	864,37 ±77,54	760,52 ±48,74	2683,78 ±1466,24	3895,54 ±1616,14	331,47 ±119,66

ÖÇÇ: Ön Çöktürme Çamuru, SÇÇ: Son Çöktürme Çamuru, SÇ: Susuzlaştırılmış Çamur, TLA: Tespit Limiti Altı

konsantrasyonlarda Salihoglu (2013)'nin çalışmasında Doğu AAT için 1,65, Batı AAT için 0,84 olarak düşük konsantrasyonlardadır. Bu çalışmadaki ortalama yıllık sonuçlara göre Alvarez vd. (2002)'nin sonuçlarına (23,2-36,5) yakın ve daha düşük konsantrasyonda 19,73 tespit edilmiştir. Pb konsantrasyonu literatürde Oliveira vd., (2007)'nin çalışmasında 1065 ± 2038 mg/kg KM, Salihoglu (2013)'nin çalışmasında Doğu AAT'de 0,54 mg/kg KM, Batı AAT'de 0,35 mg/kg KM olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere Pb konsantrasyonu çok yüksek aralığa sahiptir. Bizim çalışmamızdaki veriler bu aralığın içerisinde 9,82 mg/kg KM olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışmadaki susuzlaştırılmış çamurdaki en yüksek metal konsantrasyonu sırası ile Zn ve Cu olmuştur. İncelenen literatür çalışmalarında da en yüksek metal konsantrasyonu Zn olmuştur. Salihoglu (2013)'nin çalışmasında literatürdeki diğer çalışmalara göre özellikle Zn konsantrasyonunda (3,95-4,57) olduğu gibi diğer metaller için de oldukça düşük tespit edilmiştir. Salihoglu (2013)'nin çalışması haricindeki diğer çalışmalara göre Zn konsantrasyonu 930 – 13704 mg/kg KM aralığında değişmiştir. Bu çalışmada ise bu aralığın biraz altında 782,31 mg/kg KM tespit edilmiştir.

5.5. Arıtım Aşamalarındaki Metallerin Davranışları

İlkbahar dönemindeki ara kademelerdeki ağır metal dağılımları Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu verilere göre tüm arıtım aşamalarında en yüksek metal yüzdesinin Zn olduğu ve ikinci en yüksek metalin Cu görülmektedir. Ham sudaki Zn nispi bolluğu %69 iken diğer arıtım aşamalarının sıvı fazında %74-79'a yükselmiştir. Katı fazda ise ön çöktürme çamurunda %93, son çöktürme çamurunda %98 ve susuzlaştırılmış çamurda %87 olarak gözlenmiştir. Cu oranında ise sıvı fazda birbirini takip eden arıtım aşamalarında kademe kademe azalma görülmüştür. Ham sudaki Cu'nun nispi bolluğu %13 iken çıkış atıksuyunda %7'dir. Ön çöktürme çamurunda %4, son çöktürme çamurunda %0,9, susuz çamurda ise %7 olmuştur. Zn'nin en yüksek, Cu'nun da en düşük nispi bolluğu son çöktürme çamurunda görülmüştür. Hg tespit limitinin altında olduğu için %0 olarak görülmektedir.

Hg'den sonraki en düşük oran As'de tespit edilmiş ve ham suda %0,98 iken çıkış atıksuyunda %1,25 olarak daha yüksek tespit edilmiştir. Katı fazda da en yüksek oran susuz çamurda %0,33 olmuştur. Fakat çamurdaki As oranları sıvı faza göre düşüktür. Sıvı fazdaki Ni yüzdesi en düşük ön çöktürme de %5, hamsu ve son çöktürmede yaklaşık %9 çıkış suyunda ise %10 görülürken, katı fazda en düşük son çöktürme çamurunda %0,27 en yüksek susuz çamurda %1,73 olarak sıvı faza göre düşük oranda görülmüştür. As, Cd, Cu, Ni ve Pb'de atıksudaki nispi bollukları çamurdakinden yüksek gözlenmiştir. Cr, susuz çamur verisi hariç diğer aşamalarda atıksu verilerinde daha yüksek oranda gözlenmiştir. Buna karşı Zn'nin nispi bolluğu çamur verilerinde daha yüksekken atıksu verilerinde daha düşüktür.

Yaz dönemindeki ara kademelerdeki ağır metal dağılımları şekilde 8.2'de verilmiştir. Tüm arıtım aşamalarında, ilkbahar döneminde olduğu gibi en yüksek nispi bolluğa sahip metal Zn iken ilkbahar döneminden farklı olarak ikinci en yüksek metal Pb olmuştur. Zn'nin sıvı fazda en düşük nispi bolluğu ham suda %65, en yüksek son çöktürme atıksuyunda %90 görülmüştür. Katı fazda ise her aşamada artış görülmüştür. Ön çöktürme çamuru %48, son çöktürme çamuru %69 ve susuzlaştırılmış çamur %70 Zn içermektedir. Pb ise sıvı fazda en yüksek ham suda %22 iken en düşük son çöktürme

Çizelge 5.4. Katı fazdaki metallerin literatür karşılaştırması

Referans	Ülke	As (mg/kg KM)	Cd (mg/kg KM)	Cr (mg/kg KM)	Hg (mg/kg KM)	Ni (mg/kg KM)	Pb (mg/kg KM)	Cu (mg/kg KM)	Zn (mg/kg KM)	%KM
Chipasa, (2003)	Polonya	-		6-22	-	-	65-135	275-625	1100-2500	
Karvelas vd., (2003)	Yunanistan	-	10 ±4	370 ±100	-	300 ±76	330 ±84	1200 ±220	4500 ±450	22 ±0,5
Oliveira vd., (2007)	Brezilya	76 ± 66	3 ± 4	136 ± 76	-	852 ± 1693	1065 ± 2038	5943 ± 9887	9018 ± 13704	
Alvarez vd. (2002)	İspanya	-	3,37- 9,20	54,4- 439		23,2- 36,5	179-223	204-326	930- 1636	17,5- 35,7
Scancar vd. (2000)	Slovenya	-	2,5 ±0,8	856 ±259	-	621 ±187	126 ±23	433 ±126	2032 ±393	
Salihoglu (2013)	Türkiye (Bursa) (Doğu AAT)	0,85	0,10	0,81		1,65	0,54	0,63	3,95	
Salihoglu (2013)	Türkiye (Bursa) (Batı AAT)	1,04	0,09	0,85		0,84	0,35	0,50	4,57	
Bu çalışma	Türkiye (Antalya)	3,19	2,12	28,30	1,70	19,73	9,82	72,18	782,31	17-21

atıksuyunda %9'dur. Katı fazdaki Pb içeriği atıksudan fazla olmuş ve her aşamada azalmıştır. En yüksek ön çöktürme çamurunda %46, sonra son çöktürme çamurunda %27, susuzlaştırılmış çamurda ise %20'dir. Sıvı fazdaki tüm aşamalarda Pb dan sonra en yüksek metal Cr olmuştur ve hamsu %7, çıkış suyu %0,38 Cr içermektedir. Katı fazdaki tüm aşamalarda ise Pb'dan sonraki en yüksek metal Cu olmuştur ve ön çöktürme çamurunda %4, son çöktürme çamurunda %3 ve susuzlaştırılmış çamurda %6'dır. Ayrıca Cu, son çöktürme atıksuyunda tespit limitinin altında kaldığı için ~%0'dır. Hg tüm aşamalarda tespit limitinin altında kalırken Ni susuzlaştırılmış çamur haricindeki tüm aşamalarda tespit limitinin altında kalmıştır. Bu sebeple bu aşamalarda ~%0'dır. Susuz çamurdaki Ni ise dikkate değer bir şekilde %0,86 olarak tespit edilmiştir. Genel olarak Pb ve Cu'nun (Cu için hamsu verisi hariç) katı fazda, Zn'nin (hamsu verisi hariç) sıvı fazda daha yüksek nispi bolluğa sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, diğer metaller için her aşamada farklı sonuçlar gözlenmiştir.

İlkbahar ve yaz döneminden farklı olarak hamsu verilerinde en yüksek metal içeriği %41 ile Pb'dır. Ayrıca, sıvı fazdaki diğer aşamalarda en yüksek metal Zn olmasına karşın ilkbahar ve yaz dönemine göre daha düşük oranlarda (%46-50) tespit edilmiştir. Katı fazdaki Zn ön çöktürme çamurunda %65, son çöktürme çamurunda %62 ve susuzlaştırılmış çamurda %75'dir. Hamsudaki en yüksek metal içeriği Pb'de olmasına rağmen sıvı fazdaki diğer aşamalarda daha düşük oranlarda (%8-15) görülmüştür. Ön çöktürme ve son çöktürme çamurunda sırasıyla %16 ve %17 olarak gözlenirken susuz çamurda %5'dir. Ayrıca diğer dönemlerde çok düşük oranlarda görülen Hg, sonbahar döneminde sıvı fazda en yüksek iki ya da üçüncü metal olmuştur. Hamsu %10, ön çöktürme atıksuyun %14, son çöktürme atıksuyun %12 ve çıkış suyu %15 Hg içermektedir. Katı fazda ise daha düşük oranlarda gözlenmiştir. Ön çöktürme çamuru %2,48 son çöktürme çamurunda %1,78 ve susuz çamurda %0,14'dür. Benzer şekilde As'nin nispi bolluğu da diğer dönemlere göre yüksek tespit edilmiştir. Sıvı fazdaki her arıtım aşamasında nispi bolluğunda artış gözlenmiştir, hamsuda %1 iken çıkış da %5'dir. Katı fazda ise ön çöktürme çamurunda %0,6, son çöktürme çamurunda %0,7 ve susuz çamurda %0,5'dir.

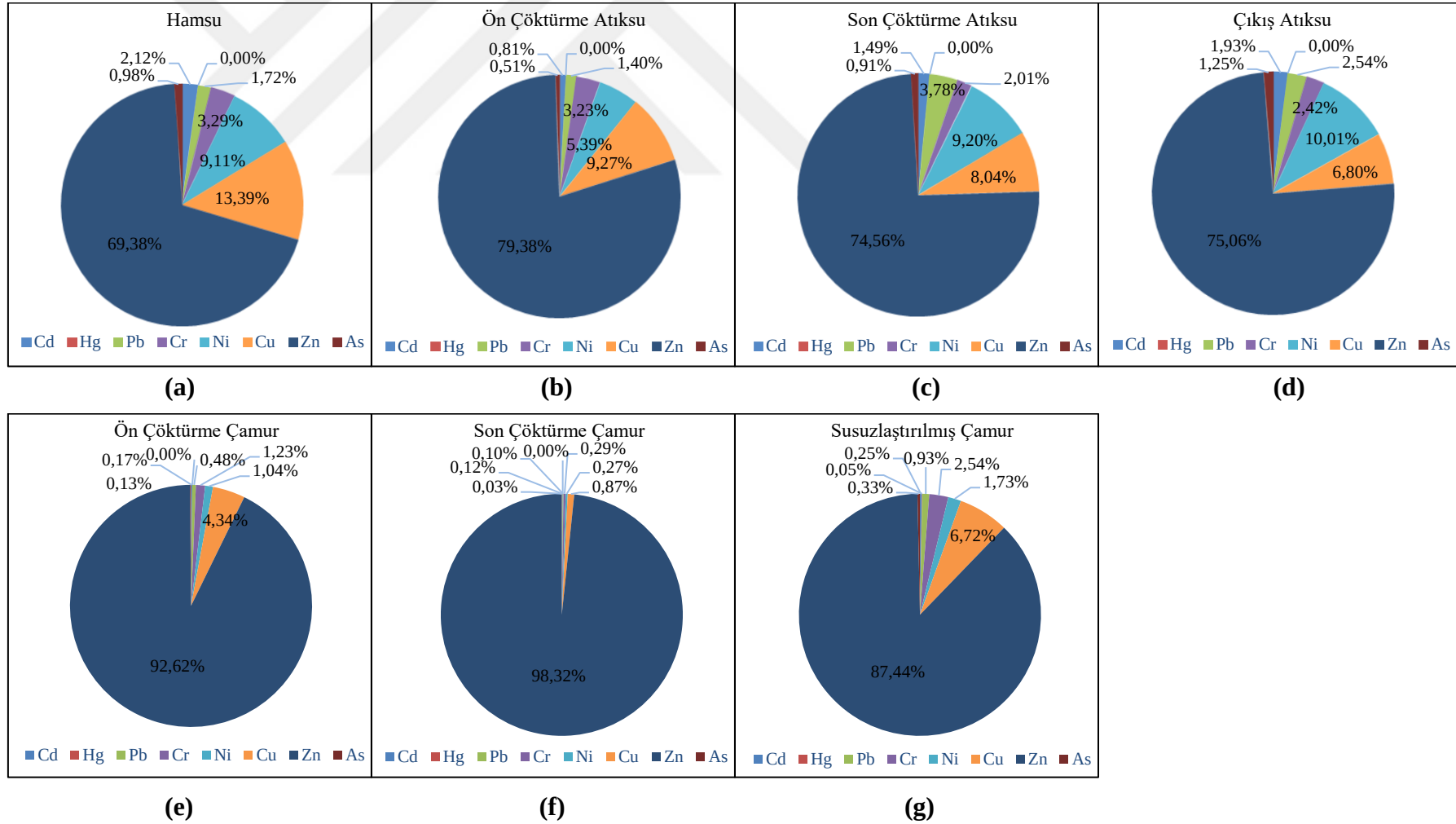
Cu içeriği giriş ve çıkış suyunda %5'lerde iken ön çöktürme ve son çöktürme atıksuyunda %10'larda görülmüştür. Katı faza ise her aşamada artış görülmüştür. Ön çöktürme çamurunda %8, son çöktürme çamurunda %11 ve susuz çamurda %12'dir. Son çöktürme atıksuyu hariç diğer sıvı faz aşamalarında en düşük metal içeriği Cd olarak görülmüştür. Hg, Ni ve As'nin nispi bolluğu sıvı fazda da yüksek Zn'nin ise katı fazda daha yüksek görülmüştür. Diğer metaller için bu durumda değişkenlik göstermiştir.

Kış dönemindeki ara kademelerdeki ağır metal dağılımları ise Şekil 5.4'de verilmiştir. Diğer dönemlerde de olduğu gibi ön çöktürme atıksuyu hariç tüm arıtım aşamalarında en yüksek metal Zn'dir. Hamsu %52, ön çöktürme atıksuyu %43, son çöktürme atıksuyu %65 ve çıkış suyu %36'dır. Katı fazda ise ön çöktürme, son çöktürme ve susuz çamurda sırasıyla; %86, %94, %86 olarak tespit edilmiştir. Ön çöktürme atıksuyunda en yüksek tespit edilen metal %45 ile Pb olmuştur. Ayrıca Pb sıvı fazdaki diğer arıtım aşamalarında da Zn den sonra gelen en yüksek metaldir. Hamsuda %33, çıkış suyunda %35'dir. Katı fazda ise 0,4-1,4 arasında değişmektedir. Diğer dönemlere göre Cd'de artış gözlenmiş ve hamsuda %6, ön çöktürme atıksuyunda %4 son çöktürme atıksuyunda %8 ve çıkış suyunda %19 tespit edilmiştir. Katı fazda ise ön çöktürme, son çöktürme ve susuz çamurda sırasıyla %0,23; %0,34 ve %0,29'dur. Katı fazda Zn'den

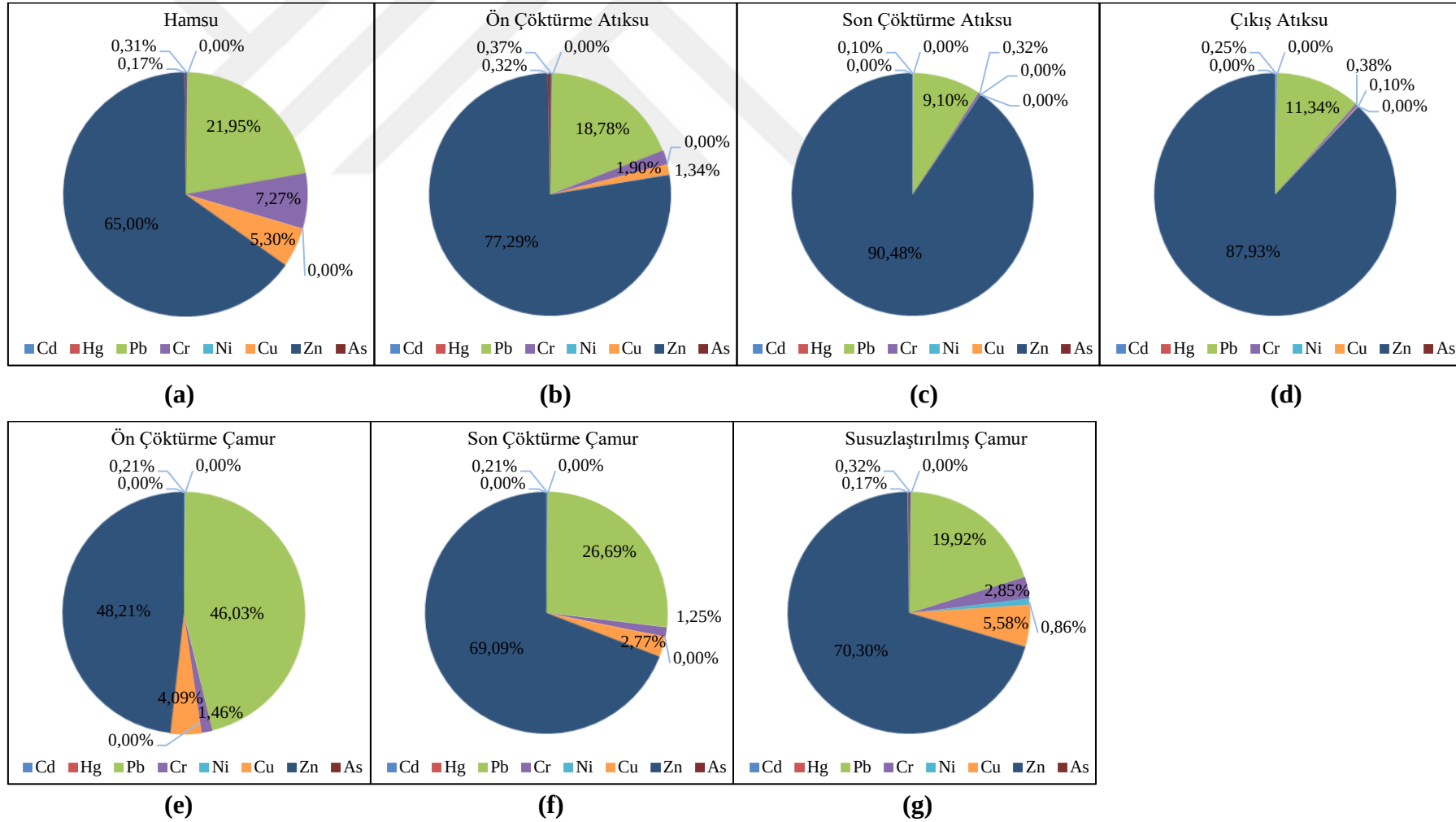
sonra en yüksek metal Cu olmuştur. Ön çöktürme çamurunda %8, son çöktürme çamurunda %3 ve susuz çamurda %7'dir. Cd, Pb ve Ni'nin nispi bolluğu sıvı fazda da yüksek Zn'nin ise katı fazda daha yüksek görülmüştür. Diğer metaller için bu durumda değişkenlik göstermiştir.

Tüm mevsim dönemlerinde birkaç istisna dışında arıtım aşmalarındaki en yüksek metal Zn ve en düşük As ve Hg olmuştur. Fakat sonbahar döneminde metaller, diğer dönemlere göre farklı dağılıma sahiptir. Sonbahar döneminde en düşük metaller Cd, Cr ve As olmuştur. Ayrıca yaz dönemi haricinde diğer tüm mevsim dönemlerinde Zn'nin katı fazdaki nispi yoğunluğu sıvı fazdan yüksek olmuştur. Cantinho vd. (2016) literatürdeki, içerisinde bizim de incelediğimiz çalışmaların bulunduğu, benzer çalışmaları inceleyerek bu çalışmaların arıtma aşamalarındaki nispi bolluklarını gösteren yüzdesel grafiklerini belirlemişlerdir. Bu verilere göre Karvelas vd. (2003)'nin çalışmasına da bizim çalışmamıza benzer şekilde Zn %'desi katı fazda sıvı faza göre yüksek olmuştur. Sıvı fazda %33-34 iken birincil çamurda %66, ikincil çamurda %72 ve son çamurda ise %67 olmuştur. Yaz döneminde sıvı fazın çamur fazından yüksek olması sıvı fazdan giderimin düşük olmasıyla bağlantılı olabilir. Tüm mevsim dönemlerinde giderim verimi %54-80 arasında değişirken yaz döneminde %2 olmuştur. Cu'nun sonbahar ve kış dönemindeki giriş ve çıkış suları karşılaştırıldığında nispi bolluklarında çok bir değişim olmamış, hatta sonbahar döneminde ön çöktürme ve son çöktürme atıksularında daha yüksek olarak gözlenmiştir. Bu durum geri devir ile gelen atıksudaki Cu yüzdesi ile ilgili olabilir. Bu çalışmada geri devir suları incelenmemiştir fakat, Goldstone vd. (1990a, b, c) incelemiştir. Cantinho vd. (2016), Goldstone vd. (1990a, b, c)'nin verilerine göre biyolojik reaktöre dönen geri devir sularındaki yüzde dağılımlarının diğer aşamaları etkilemiş olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, bizim çalışmamıza benzer şekilde Cu yüzdesi birincil çöktürme ve çıkış suyunda hamsuya göre artış gözlenmiş ve bu durum hamsu+anaerobik çürütücü geri devir ve birincil çöktürücü+ aktif çamur geri döngüsündeki Cu yüzdesinde gözlenen artışa bağlı olabileceği düşünülmüştür.

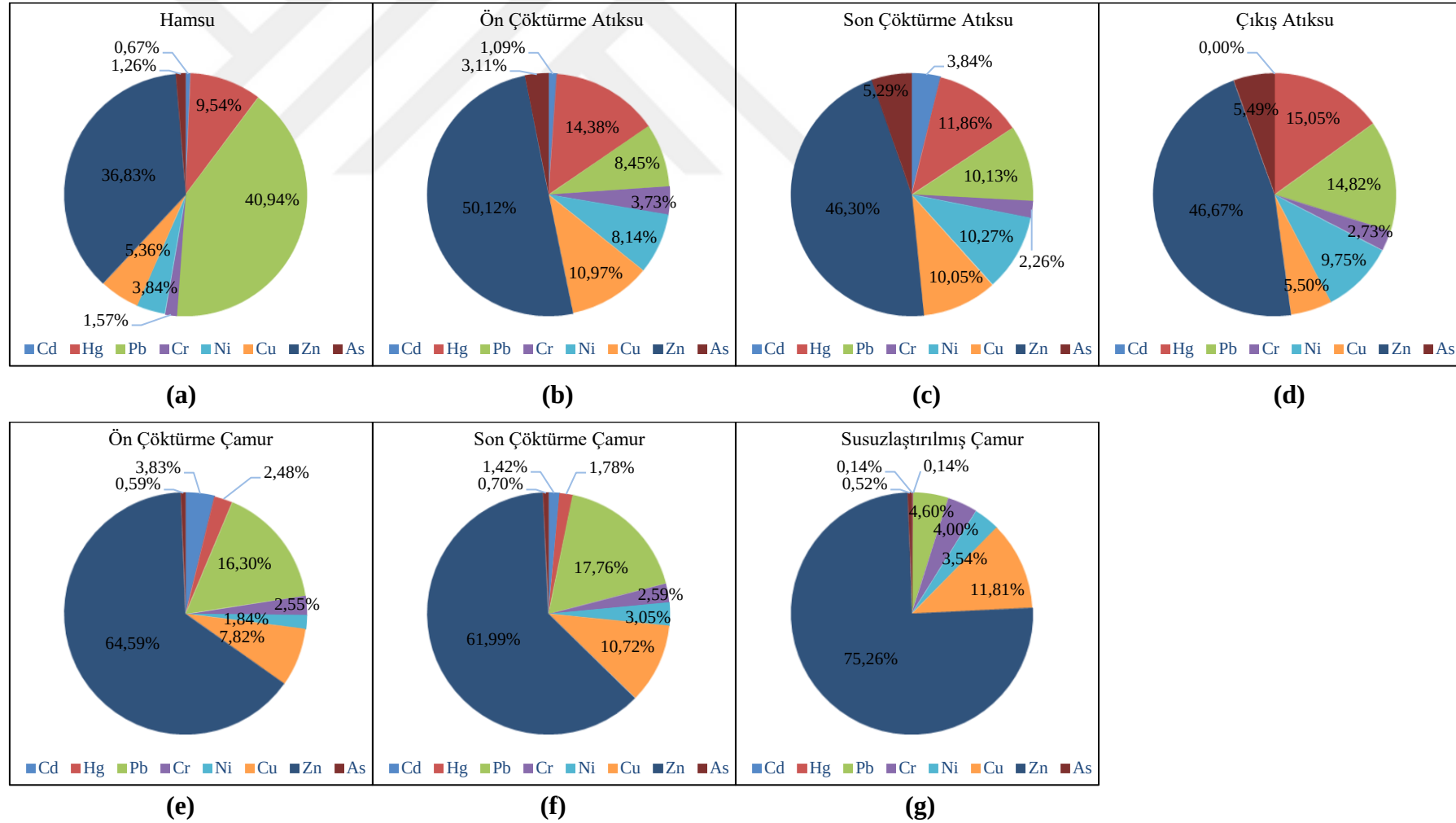
Hg, genel olarak tespit limitinin altında veya çok düşük yüzdede gözlenirken sonbahar döneminde ise sıvı fazda en yüksek metaller arasında olmuştur. Literatürde de Hg'nin nispi yoğunluğu düşük tespit edilmiştir. Cantinho vd. (2016) incelediği literatür çalışmalarında Goldstone vd. (1990a, b, c)'nin incelediği AAT'de sıvı faz %0,1-0,2 katı fazda %0,2-0,3 arasında, Carletti vd. (2008)'nin incelediği AAT'lerinde de sıvı fazda %0,1-1,1, katı fazda %0,2-1,2 arasında görülmüştür. Cd ve Cr'nin nispi bollukları her mevsim döneminde farklı olmuştur. Fakat, Ni'nin yaz hariç tüm mevsim dönemlerinde sıvı fazdaki nispi bolluğu katı fazdan daha yüksek olmuştur. Karvelas vd. (2003)'nin çalışmasında da Ni konsantrasyonu sıvı fazda en yüksek (%54,7-55) nispi bolluğa sahip metalken, bu çalışmadaki gibi katı fazda daha düşük (%4,5-6,9) orandadır. Benzer şekilde As ve Pb'de de tüm mevsim dönemlerinde (Pb için yaz dönemi hariç) sıvı fazdaki nispi bollukları katı fazdan yüksek olmuştur. Mevsim dönemlerindeki metallerin nispi bolluklarında farklı yüzdelere karşılaştırılmasına rağmen birkaç istisna dışında metallerin sıralaması benzer olmuştur.



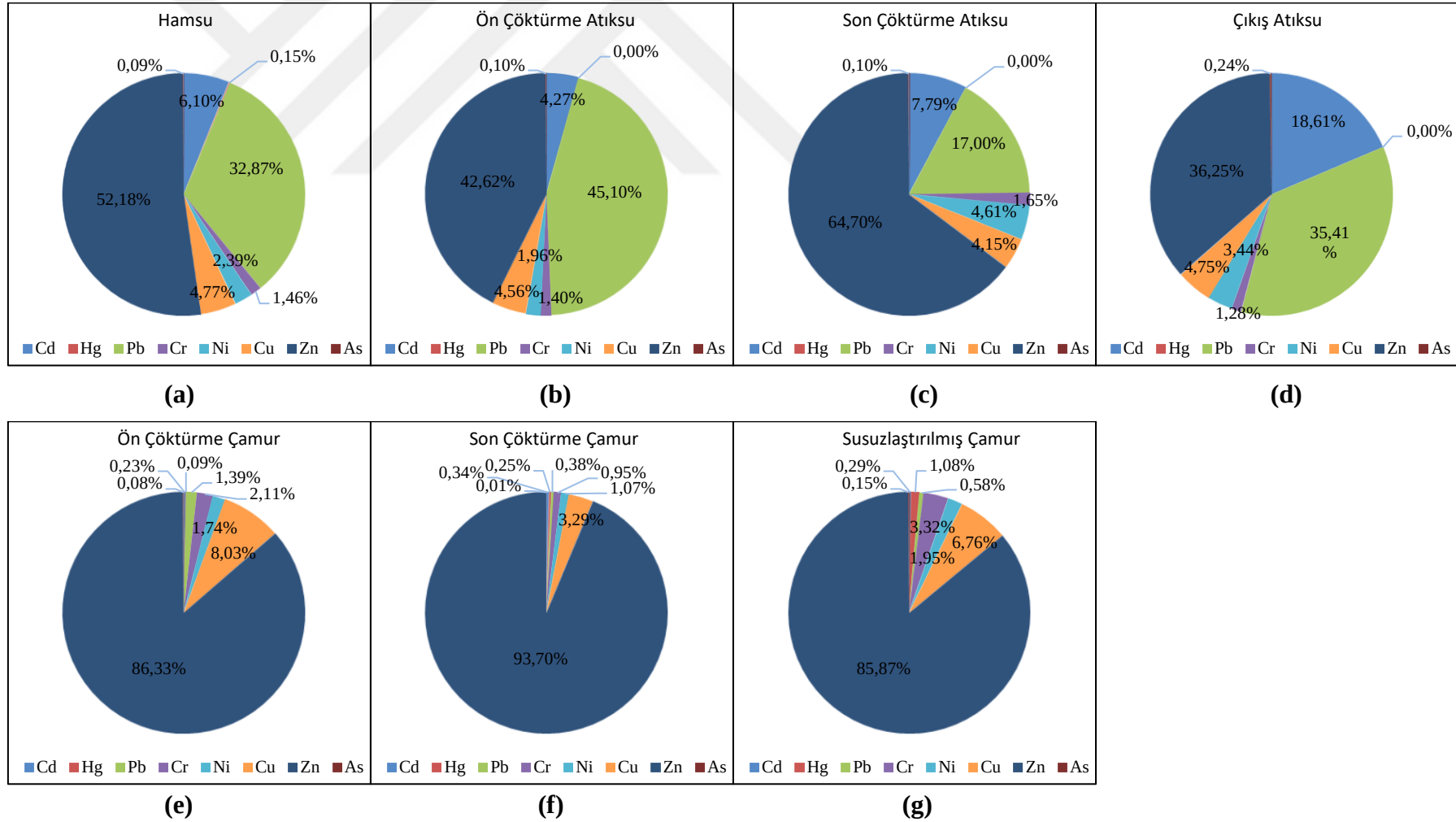
Şekil 5.1. İlkbahar dönemi metallerin dağılımı **(a)** hamsu; **(b)** ön çöktürme atıksu; **(c)** son çöktürme atıksu; **(d)** çıkış atıksu; **(e)** ön çöktürme çamuru; **(f)** son çöktürme çamuru; **(g)** susuzlaştırılmış çamur



Şekil 5.2. Yaz dönemi metallerin dağılımı (a) hamsu; (b) ön çöktürme atıksu; (c) son çöktürme atıksu; (d) çıkış atıksu; (e) ön çöktürme çamuru; (f) son çöktürme çamuru; (g) susuzlaştırılmış çamur



Şekil 5.3. Sonbahar dönemi metallerin dağılımı **(a)** hamsu; **(b)** ön çöktürme atıksu; **(c)** son çöktürme atıksu; **(d)** çıkış atıksu; **(e)** ön çöktürme çamuru; **(f)** son çöktürme çamuru; **(g)** susuzlaştırılmış çamur



Şekil 5.4. Kış dönemi metal dağılımı (a) hamsu; (b) ön çöktürme atıksu; (c) son çöktürme atıksu; (d) çıkış atıksu; (e) ön çöktürme çamuru; (f) son çöktürme çamuru; (g) susuzlaştırılmış çamur

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Antalya ilinin en büyük kentsel atıksu arıtma tesisindeki sıvı ve katı fazdaki ağır metal içerikleri ile mevcut arıtım proseslerinin ağır metal giderim performansları incelenerek ağır metallerin atıksu arıtma tesislerindeki davranışlarını değerlendirilmiştir. Tüm mevsim dönemlerinde örneklemesine göre tesise giren en yüksek metalin Zn olduğu görülmüştür. Ayrıca ilkbahar dönemi haricindeki diğer dönemlerde Zn'den sonra tesise gelen en yüksek metal Pb olmuştur. Genel olarak, yıllık ortalama ham sudaki metal konsantrasyonlarının nispi bolluğu $As < Hg < Cr < Cd < Ni < Cu < Pb < Zn$ şeklinde, yıllık ortalama çıkış akımındaki metal konsantrasyonlarındaki nispi bolluğu ise $As < Cr < Hg < Ni < Cu < Cd < Pb < Zn$ şeklinde olmuştur. En yüksek metal konsantrasyonu Zn olurken en düşük metal konsantrasyonu As de görülmüştür. Fakat, Zn ve bileşikler diğer metaller göre daha düşük toksik etkiye sahipken As düşük konsantrasyonlarda bile toksisitesi yüksek metallere dendir. Zn'nin ve Pb'nin yüksek konsantrasyonlarda bulunmasının Antalya şehrinin tarım kenti olmasından dolayı Zn için gübre kullanımından, Pb için pestisit kullanımıyla ilgili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yüksek Zn içeriğinin hem evsel kaynaklı atıksularda bulunmasından hem de çevredeki küçük ölçekli metal sanayilerinin olmasından kaynaklı olabilir. Pb'nin de su borularında ve tesisatlarda kullanımı sonucu atıksuya karışması ve yüzey akışı ya da sanayiden kaynaklı da olabilir.

Tüm mevsim dönemlerinde birkaç istisna dışında arıtım aşamalarındaki en yüksek metal Zn ve en düşük As ve Hg olmuştur. Fakat sonbahar döneminde metaller, diğer dönemlere göre farklı dağılıma sahiptir. Sonbahar döneminde en düşük metaller Cd, Cr ve As olmuştur. Ayrıca yaz dönemi haricinde diğer tüm mevsim dönemlerinde Zn'nin katı fazdaki nispi yoğunluğu sıvı fazdan yüksek olmuştur. Yaz döneminde sıvı fazın çamur fazından yüksek olması sıvı fazdan giderimin düşük olmasıyla bağlantılı olabilir. Tüm mevsim dönemlerinde Zn'nin giderim verimi %54-80 arasında değişirken yaz döneminde %2 olmuştur. Ni'nin yaz hariç tüm mevsim dönemlerinde sıvı fazdaki nispi bolluğu katı fazdan daha yüksek olmuştur. Benzer şekilde As ve Pb'de de tüm mevsim dönemlerinde (Pb için yaz dönemi hariç) sıvı fazdaki nispi bollukları katı fazdan yüksek olmuştur. Mevsim dönemlerindeki metallerin nispi bolluklarında farklı yüzdelerle karşılaşılmasına rağmen birkaç istisna dışında metallerin sıralaması benzer olmuştur.

Bu tesisteki giderim verimi en düşük Cd ve As 'de (sırasıyla %21, %24), en yüksek ise Cu, Pb ve Cr'de (sırasıyla %75, %75, %71) gerçekleşmiştir. Literatürde incelenen çalışmalarda hem giriş ve çıkış konsantrasyonu hem de giderim verimlerinde farklı sonuçlar görülmüştür. Bu durumun sebebi, metal konsantrasyonlarını ölçmek için kullanılan analitik tekniklerdeki farklılıklar ve çalışma koşulları olabileceği gibi tesisin işletim koşullarındaki farklılıklar da olabilir. Ülkemizde, kentsel atıksu deşarjı ile ilgili yönetmeliklerde ağır metallerin sınır değerlerine dair henüz bir veri olmadığı için karşılaştırılma yapılamamıştır. Fakat yakın gelecekte Avrupa Su Çerçeve Direktifi'nin son yönergelerine bağlı olarak, nihai atık sular için daha kısıtlayıcı sınırlar uygulanması beklenmektedir. EC166/2006 sayılı yönergede yer alan kirleticilerin çevreye salınım limitlerine göre tesisin çıkış suyu değerleri kg/yıl bazında suya salınım limitlerinin çok üzerindedir. Bu limit değerler sadece Cd yaz ve sonbahar döneminde, Hg ilkbahar, yaz ve kış döneminde, Ni, As, Cu ve Cr de yaz döneminde karşılamaktadır. Bu sebeple arıtma tesislerinin Avrupa standartlarını karşılayabilmesi için ağır metal giderimi için iyon değişimi, kimyasal çöktürme, adsorpsiyon gibi arıtım yöntemleri kullanılabilir.

Tüm mevsim dönemlerinde tüm çamur numunelerinde en yüksek metal konsantrasyonu Zn olmuştur. Ön çöktürme çamurunda Zn konsantrasyonu, İlkbahar döneminde $6769,17 \pm 1584,96$, yaz döneminde $94,51 \pm 8,21$, son bahar döneminde $1191,01 \pm 249,76$ ve kış döneminde $2683,78 \pm 1466,24$ mg/kg KM şeklinde görülmüştür. En yüksek konsantrasyon ilkbahar döneminde, en düşük konsantrasyon yaz döneminde tespit edilmiştir. Ayrıca, yaz döneminde Pb hariç diğer metal konsantrasyonları da diğer dönemlerden düşük olmuştur. Bunun sebebi yaz döneminde tesise gelen atıksudaki metal konsantrasyonlarının daha düşük olmasından kaynaklı olabilir. Susuzlaştırılmış çamurdaki yıllık ortalama en düşük metal konsantrasyonu Hg ve daha sonra Cd olmuştur. Susuzlaştırılmış çamurdaki en yüksek metal konsantrasyonu sırası ile Zn ve Cu olmuştur. Susuzlaştırılmış çamurun ülkemizdeki tarımda kullanım için uygulanan limitlerinin altındadır fakat tesiste ileri arıtma ile sadece azot ve fosfor giderimi gerçekleştirildiğinden ilgili tesise ait çamurların toprağa uygulamasının çok da verimli olacağı düşünülmemektedir.



7. KAYNAKLAR

- Alvarez, E. A., Mochon, M. C., Sanchez, J. C. J. ve Rodrigez, M. T. (2002). Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants,. *Chemosphere*, 47: 765–775.
- Anonim 1: <https://www.saglikocagim.net/minamata-hastaligi-nedenleri-belirtileri/>, [Son Erişim Tarihi: 29.09.2017].
- Anonim 2: <https://antalya.tarim.gov.tr/Menu/60/Antalya>, [Son Erişim Tarihi: 01.05.2019].
- Anonim 3: <http://www.cografya.gen.tr/tr/antalya/ekonomi.html>.
- Anonim 4: <http://www.cografya.gen.tr/tr/antalya/>.
- Anonim 5: <https://www.asat.gov.tr/tr/tesisler/hurma-aritma-tesisi-2.html?CatID=2>.
- Anonim 6: İleri Atıksu Arıtımı. Repéré à <http://web.deu.edu.tr/atıksu/ana58/bolum06.pdf>
- Arslan, T. (2008). Kompleks Olarak Bağlı Ağır Metal İçerikli Atıksuların Elektrokoagülasyon ile Arıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 124 s.
- Aslan, S., Bozkurt, Z. ve Tekeli, A. N. (2007). Removal of Cu (II), Ni (II), Cd (II) And Cr (VI) Ions From Aqueous Solutions By Biosorption Processes. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 25(2): 209–222.
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği. (2010). T.C. Resmi Gazete (sayı 27527).
- Aydiner, C. (2006). Hibrit Mikrofiltrasyon Teknolojisi ile Sulu Ortamdan Nikel Giderimi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 173 s.
- Bektaş, N. B. ve Altaş, L. (2016). İleri Dezenfeksiyon Yöntemleri. 1. Ulusal Çevre Mühendisliği Öğrencileri Sempozyumu ss. 390–395, Konya.
- Busetti, F., Badoer, S., Cuomo, M., Rubino, B. ve Traverse, P. (2005). Occurrence and removal of potentially toxic metals and heavy metals in the wastewater treatment plant of fusina (Venice, Italy). *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(24): 9264–9272.
- Buzier, R., Tusseau-Vuillemin, M. H., dit Meriadec, C. M., Rousselot, O. ve Mouchel, J. M. (2006). Trace metal speciation and fluxes within a major French wastewater treatment plant: Impact of the successive treatments stages. *Chemosphere*, 65(11): 2419–2426.
- Cantinho, P., Matos, M., Trancoso, M. A. ve dos Santos, M. M. (2016). Behaviour and fate of metals in urban wastewater treatment plants: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(1): 359–386.
- Carletti, G., Fatone, F., Bolzonella, D. ve Cecchi, F. (2008). Occurrence and fate of heavy metals in large wastewater treatment plants treating municipal and industrial wastewaters. *Water Science and Technology*, 57(9): 1329–1336.
- Çay, S. (2014). Ağır Metal İyonlarıyla Kirletilmiş Toprakların Karadeniz Bölgesinde Yetişen Bazı Süs Bitkileri Kullanılarak Temizlenebilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 130 s.

- Çay, Ş. (2013). Bir Metal Son İşlemleri Endüstrisi Atıksularında En Uygun Arıtma Teknolojilerinin ve Atıksu Geri Kazanmanın Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, 126 s.
- Çayıldak, V., Özcan, S. ve Koçyiğit, H. (2016). Ağır Metallerin Çevresel Özellikleri ve Endüstriyel Atıksulardan Arıtılması. 1. Ulusal Çevre Mühendisliği Öğrencileri Sempozyumu ss. 447–454, Konya.
- Cebe, K. (2016). Kıyısız Sularda Su Kalitesi Modellemesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 249 s.
- Çetin, S. (2004). Düşük Maliyetli Bir Sorbent Olan Uçucu Kül ile Sulu Çözeltilerden Ağır Metal Sorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya 64 s.
- Çevre Kanunu. (1983). T.C. Resmi Gazete (sayı 18132).
- Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. (2018). Antalya İli 2017 Yılı Çevre Durum Raporu.
- Chipasa, K. B. (2003). Accumulation and Fate of Selected Heavy Metals in a Biological Wastewater Treatment System. *Waste Management*, 23(2): 135–143.
- Clara, M., Kreuzinger, N., Strenn, B., Gans, O. ve Kroiss, H. (2005). The solids retention time—a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. *Water Research*, 39: 97–106.
- Dinç, H. (2012). Gaziantep sanayi atık sularında arıtma öncesi ve sonrası ağır metal düzeyleri. *YYU Veteriner Fakültesi Dergisi*, 24(1): 19-24.
- Doğan, F. (2010). Mevcut Atıksu Arıtma Tesislerinin Fosfor Giderimi için Rehabilitasyonunda Seçeneklerin Değerlendirilmesi. Çevre ve Orman Uzmanlık Tez, Çevre ve Orman Bakanlığı, 163 s.
- Dündar, M. Ş., Altundağ, H. ve Kaygaldurak, S. (2012). Determination of Heavy Metal Levels in Various Industrial Waste Waters. *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, 6–12.
- Dündar, Y. ve Aslan, R. (2005). Yaşamı Kuşatan Ağır Metal Kurşunun Etkileri. *Kocatepe Tıp Dergisi*, 6(2): 1–5.
- EC. (1986). Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC). *Official Journal of the European Communities*, L 181, 04.07.1986.
- EC. (2001). Pollutants in Urban Waste Water and Sewage Sludge. Final Report. *Office for Official Publications of the European Communities*, Şubat 2001.
- EC. (2006). Regulation (EC) No 166/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 January 2006 concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91/689/EEC and 96/61/EC (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*, L 33, 04.02.2006.
- EC. (2013). Directive 2013/39/EU Of The European Parliament and of the Council of 12 August 2013 Amending Directives 2000/60/EC And 2008/105/EC as Regards Priority Substances in the Field of Water Policy. *Official Journal of the European Union*, L 226, 24.8.2013.
- Edokpayi, J. N., Odiyo, J. O., Msagati, T. A. M. ve Popoola, E. O. (2015). Removal

- Efficiency of Faecal Indicator Organisms, Nutrients and Heavy Metals from a Peri-Urban Wastewater Treatment Plant in Thohoyandou, Limpopo Province, South Africa. *International journal of environmental research and public health*, 12(7): 7300–7320.
- Er, M. B. (2016). Metal Sanayi Atıksularının Arıtımı ve Bu Atıksuların Çevre Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 85 s.
- Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik. (2010). T.C. Resmî Gazete (sayı 27661).
- Filiz, E. (2007). Doğal Kaynaklardan Elde Edilen Adsorbanlarla Sulardan Ağır Metal Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 123 s.
- Goldstone, M. E., Kirk, P. W. W. ve Lester, J. N. (1990a). The Behaviour of Heavy Metals During Wastewater Treatment II. Lead, Nickel and Zinc. *Sci Total Environ* 95: 253–270.
- Goldstone, M. E., Kirk, P. W. W. ve Lester, J. N. (1990b). The Behaviour of Heavy Metals During Wastewater Treatment III. Mercury and Arsenic. *Sci Total Environ* 95: 271–294.
- Goldstone, M. E., Kirk, P. W. W. ve Lester, J. N. (1990c). The Behaviour of Heavy Metals During Wastewater Treatment I. Cadmium, Chromium and Copper. *The Science of the Total Environment*, 95: 233–252.
- Gulyas, G., Pitas, V., Fazekas, B. ve Karpati, A. (2015). Heavy Metal Balance In A Communal Wastewater Treatment Plant. *Hungarian Journal Of Industry And Chemistry*, 43(1): 1–5.
- Güneş, S. (2018). Artık Materyal Kullanılarak Adsorpsiyon Yöntemi ile Atıksulardan Kurşun Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 89 s.
- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A. B., Cansaran Duman, D. ve Aras, S. (2012). Biyosorpsiyon, adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69(4): 235–253.
- Inglezakis, V. J., Zorpas, A. A., Karagiannidis, A., Samaras, P., Voukkali, I. ve Sklari, S. (2014). European Union Legislation 2011-2012. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23(2a): 635–639.
- Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A. ve Timur, S. (2003). Metallerin Çevresel Etkileri -I. *Metallurji Dergisi*, 136: 47–53.
- Karvelas, M., Katsoyiannis, A. ve Samara, C. (2003). Occurrence and Fate of Heavy Metals in the Wastewater Treatment Process. *Chemosphere*, 53(10): 1201–1210.
- Kaynak, A. G. ve Taşdemir, Y. (2003). Anaerobik Stabilizasyon Havuzlarında Ağır Metal Giderimi: Bursa Örneği. *Ekoloji Çevre Dergisi*, 12(46): 1–7.
- Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği. (2006). T.C. Resmi Gazete (sayı 26047).
- Koyuncu, S. (2014). Konya Atıksu Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Çürütücülerinde Optimum Biyogaz Verimi İçin İşletme Şartlarının ve Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 180 s.
- Mattsson, A., Mattsson, J. ve Davidsson, F. (2012). A strategy for reducing pollutants at

- source in order to obtain sustainable agricultural recycling of wastewater sludge. *Water Science and Technology*, 66(9): 1879–1884.
- Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and reuse.
- Okcu, M., Tozlu, E., Kumlay, A. M. ve Pehlivan, M. (2009). Ağır Metallerin Bitkiler Üzerine Etkileri. *Alinteri Ziraat Bilimler Dergisi*, 17(B): 14–26.
- Oliveira, A. D. S., Bocio, A., Trevilato, T. M. B., Takayanagui, A. M. M., Domingo, J. L. ve Segura-Muñoz, S. I. (2007). Heavy metals in untreated/treated urban effluent and sludge from a biological wastewater treatment plant. *Environmental science and pollution research international*, 14(7): 483–9.
- Olofsson, U., Brorström-Lundén, E., Kylin, H. ve Haglund, P. (2013). Comprehensive mass flow analysis of Swedish sludge contaminants. *Chemosphere*, 90(1): 28–35.
- Önder, S. (2012). Atıksular ile Sulanan Ziraat Alanlardaki Ağır Metal Kirliliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 181 s.
- Özel, O. (2011). Hurma (Antalya) Atıksu Arıtma Tesisi Performansının Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 91 s.
- Öztürk, C. (2007). Yapay Sinir Ağları ve Asm2 Kullanılarak Aktif Çamur Prosesinin Kontrolü ve Modellenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 214 s.
- Öztürk, İ., Çallı, B., Arıkan, O. ve Altınbaş, M. Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı (El Kitabı) (2015). Türkiye Belediyeler Birliği.
- Öztürk, M. (2006). Cıva Kirliliğinin Çevre Ve Sağlık Üzerine Etkileri. Repéré 10 Nisan 2019, à <http://enginsalli.blogcu.com/civa-kirliliginin-cevre-ve-saglik-uzerine-etkileri/2668604>
- Perçin, S. (2014). Genel Hatları İtibariyle ABD, AB ve Türk Su Hukuku. Uzmanlık Tezi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, 147 s.
- Salihoglu, N. K. (2013). Assessment of Urban Source Metal Levels in Influent, Effluent, and Sludge of Two Municipal Biological Nutrient Removal Wastewater Treatment Plants of Bursa, an Industrial City in Turkey. *Clean - Soil, Air, Water*, 41(2): 153–165.
- Şama, A. (2017). Taşköprü (Kastamonu) Atıksu Arıtma Tesisi İçin Proje Aşamasında Öngörülen ve Mevcut Durumda Sağlanan Verimin Sürekliliğinin Karşılaştırılması. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1(1): 1188–1197.
- Scancar, J., Milacic, R., Strazar, M. ve Burica, O. (2000). Total Metal Concentrations and Partitioning of Cd, Cr, Cu, Fe, Ni and Zn in Sewage Sludge. *The Science of the Total Environment*, 250: 9–19.
- Şener, G. (2016). Atıksu Arıtma Tesislerinin Kırsal Alan Üzerine Etkileri. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 148 s.
- Şener, Ş. (2010). Çevre İçin Jeoloji ; Ağır Metallerin Çevresel Etkileri. *SDUGEO*, 3: 33–35.
- Sörme, L. ve Lagerkvist, R. (2002). Sources of Heavy Metals in Urban Wastewater in Stockholm. *Science of the Total Environment*, 298(1–3): 131–145.

- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. (2004). T.C. Resmi Gazete (sayı 25687).
- Tanık, A., Öztürk, İ. ve Cüceloğlu, G. Arıtılmış Atıksuların Yeniden Kullanımı ve Yağmur Suyu Hasadı Sistemleri (El Kitabı) (2015). Türkiye Belediyeler Birliği.
- Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği. (2005). T.C. Resmi Gazete (sayı 26005).
- U.S. EPA. (1993). e-CFR, Title 40: Protection of environment, Part 503: Standards for the use or disposal of sewage sludge.
- Usta Dikmen, A. (2008). Atık Sulardan Ağır Metallerin Giderilmesinde Doğal Zeolitlerin Kullanılması: Klinoptilolitin Çinko, Kurşun ve Kadmiyum İçin İyon Değişim Kapasitesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 92 s.
- Üstün, G. E. (2009). Occurrence and removal of metals in urban wastewater treatment plants. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2–3): 833–838.
- Uzun, P. (2013). Yüzey Aktif Maddeler ile Modifiye Edilen Klinoptilolitin Atık Sulardan Hekzavalent Krom Gideriminde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 75 s.
- Wang, J., Huang, C. P. ve Allen, H. E. (2006). Predicting metals partitioning in wastewater treatment plant influents. *Water Research*, 40: 1333–1340.
- Yalçın, E. (2012). Sulardan Ağır Metal Giderimi için Nanofibriler Filtrelerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 88 s.
- Yıldız, F. F. ve Dişbudak, K. (2006). AB Su Çerçeve Direktifi ve Havza Yönetimi Yaklaşımı Bağlamında AB Ortak Tarım Politikasında Su Yönetimi. *Journal Of Institutional And Theoretical Economics*, 167: 64-71.
- Yıldız, Ş., Yılmaz, E. ve Ölmez, E. (2009). Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri: İstanbul Örneği. Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu (TÜRKAY) ss. 309–316, İstanbul.
- Yücel, D. (2010). Sakarya İli Sanayi Bölgesinin Yakın Çevresinde Ve Şehir Merkezinde Oluşturduğu Atmosferik Ağır Metal Seviyelerinin Bir Biyomonitör Karayosunu (*Hypnum cupressiforme* Hedw.) ve Toprak Örnekleri Üzerinden Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 103 s.
- Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. (2019). T.C. Resmî Gazete (sayı 29327).

8. EKLER

EK-1. Kirleticilerin Çevreye Salınım Limitleri (EC, 2006)

Kirletici	Çevreye salınım limiti (Sütun 1)		
	Havaya (sütun 1a) kg/yıl	Suya (sütun 1b) kg/yıl	Toprağa (sütun 1c) kg/yıl
Arsenik ve bileşikleri	20	5	5
Kadmiyum ve bileşikleri	10	5	5
Krom ve bileşikleri	100	50	50
Bakır ve bileşikleri	100	50	50
Civa ve bileşikleri	10	1	1
Nikel ve bileşikleri	50	20	20
Kurşun ve bileşikleri	200	20	20
Çinko ve bileşikleri	200	100	100

EK-2. Öncelikli Maddeler ve Belirli Diğer Kirleticiler İçin Çevre Kalite Standartları (EC, 2013 Ek-II)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No	Maddenin adı	CAS numarası ⁽¹⁾	AA-ÇKS ⁽²⁾ İç yüzey suları ⁽³⁾	AA-ÇKS ⁽²⁾ Diğer yüzey suları	MAC-ÇKS ⁽⁴⁾ İç yüzey suları ⁽³⁾	MAC-ÇKS ⁽⁴⁾ Diğer yüzey suları	ÇKS Biota ⁽¹²⁾
(6)	Kadmiyum ve bileşikleri (su sertliği sınıflarına bağlı olarak) ⁽⁶⁾	7440-43-9	≤0,08 (Sınıf 1) 0,08 (Sınıf 2) 0,09 (Sınıf 3) 0,15 (Sınıf 4) 0,25 (Sınıf 5)	0,2	≤0,45 (Sınıf 1) 0,45 (Sınıf 2) 0,6 (Sınıf 3) 0,9 (Sınıf 4) 1,5 (Sınıf 5)	≤0,45 (Sınıf 1) 0,45 (Sınıf 2) 0,6 (Sınıf 3) 0,9 (Sınıf 4) 1,5 (Sınıf 5)	
(20)	Kurşun ve bileşikleri	7439-92-1	1,2 ⁽¹³⁾	1,3	14	14	
(21)	Civa ve bileşikleri	7439-97-6			0,07	0,07	20
(23)	Nikel ve bileşikleri	7440-02-0	4 ⁽¹³⁾	8,6	34	34	

AA: yıllık ortalama.

MAC: izin verilen maksimum konsantrasyon.

Birim: [µg / l] (4) - (7) sütunları için

[µg / kg ıslak ağırlık] (8) sütunu için

⁽¹⁾ CAS: Chemical Abstracts Service

⁽²⁾ Bu parametre, yıllık ortalama değer (AA-ÇKS) olarak ifade edilen ÇKS'dir. Aksi belirtilmedikçe, tüm izomerlerin toplam konsantrasyonu için geçerlidir.

⁽³⁾ İç yüzey suları nehirleri ve gölleri ve bunlarla ilgili yapay veya yoğun olarak değiştirilmiş su kütlelerini kapsar.

⁽⁴⁾ Bu parametre, izin verilen maksimum konsantrasyon (MAC-ÇKS) olarak ifade edilen ÇKS'dir.

⁽⁶⁾ Kadmiyum ve bileşikleri için (No 6), ÇKS değerleri, beş sınıf kategorisinde belirtilen suyun sertliğine bağlı olarak değişir (Sınıf 1: <40 mg CaCO₃/l, Sınıf 2: 40-50< mg CaCO₃/l, Sınıf 3: 50-100 < mg CaCO₃/l, Sınıf 4: 100-200<mg CaCO₃/l ve Sınıf 5: ≥ 200 mg CaCO₃/l).

⁽¹²⁾ Aksi belirtilmedikçe, biota ÇKS balıkla ilgilidir. Uygulanan ÇKS eşdeğer bir koruma sağladığı sürece alternatif bir biyo takson veya başka bir matris izlenebilir.

⁽¹³⁾ Bu ÇKS, maddelerin biyolojik olarak kullanılabilir konsantrasyonlarını belirtir.

EK-3. AB'ye Göre Çamurun Toprak ve Tarımda Uygulama Limitleri

Çizelge 8.1. Topraktaki ağır metal konsantrasyonları için sınır değerleri (pH 6 ila 7 olan toprağın, direktifte yer alan Ek II C'de tanımlandığı gibi temsili bir numunede mg/kg kuru madde) (EC, 1986 Ek I A)

Parametreler	Sınır değerler
Kadmiyum	1-3
Bakır	50-140
Nikel	30-75
Kurşun	50-300
Çinko	150-300
Civa	1-1,5
Krom	-

Çizelge 8.2. Tarımda kullanım için çamurdaki ağır metal konsantrasyonlarındaki sınır değerler (mg/kg kuru madde) (EC, 1986 Ek I B)

Parametreler	Sınır değerler
Kadmiyum	20-40
Bakır	1000-1750
Nikel	300-400
Kurşun	750-1200
Çinko	2500-4000
Civa	16-25
Krom	-

Çizelge 8.3. Tarım arazisine on yıllık ortalama esas alınarak yıllık verilmesine müsaade edilecek ağır metal sınır değerleri (kg/ha/yıl) (EC, 1986 Ek I C)

Parametreler	Sınır değerler
Kadmiyum	0,15
Bakır	12
Nikel	3
Kurşun	15
Çinko	30
Civa	0,1
Krom	-

EK-4. U.S. EPA’ya Göre Çamurun Toprak ve Tarımda Uygulama Limitleri**Çizelge 8.4.** Arıtma çamurunun arazi uygulamasındaki üst limitler (U.S. EPA, 1993)

Kirletici	Tavan konsantrasyon (mg/kg kuru ağırlık)
Arsenik	75
Kadmiyum	85
Bakır	4300
Kurşun	840
Civa	57
Molibden	75
Nikel	420
Selenyum	100

Çizelge 8.5. Tarımsal arazi, orman, halka açık bölgeye veya bertaraf alanına arıtma çamurunun uygulamasında kirleticilerin kümülatif yükleme oranı (U.S. EPA, 1993)

Kirletici	Kümülatif kirletici yükleme oranları (kg/ha)
Arsenik	41
Kadmiyum	39
Bakır	1500
Kurşun	300
Civa	17
Nikel	420
Selenyum	100
Çinko	2800

Çizelge 8.6. Tarımsal arazi, orman, halka açık bölgeye veya bertaraf alanına arıtma çamurunun uygulamasında her bir kirleticinin arıtma çamurundaki konsantrasyonu (U.S. EPA, 1993)

Kirletici	Aylık ortalama konsantrasyon (mg/kg kuru ağırlık)
Arsenik	41
Kadmiyum	39
Bakır	1500
Kurşun	300
Civa	17
Nikel	420
Selenyum	100
Çinko	2800

EK-4'ün devamı

Çizelge 8.7. Toprakta uygulanacak çamurun yıllık yükleme oranı (U.S. EPA, 1993)

Kirletici	Yıllık Kirletici Yükleme Oranları (kg/ha/yıl)
Arsenik	2,0
Kadmiyum	1,9
Bakır	75
Kurşun	15
Civa	0,85
Nikel	21
Selenyum	5,0
Çinko	140

EK-5. Kıta içi Yerüstü Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri (Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 2019)

Su Kalite Parametreleri	Su Kalite Sınıfları ^(a)			
	I	II	III	IV
İz Elementler (Metaller) ve İnorganik Kirlilik Parametreleri ^(d)				
Arsenik (µg As/L)	≤ 20	50	100	> 100
Bakır (µg Cu/L)	≤ 20	50	200	> 200
Civa (µg Hg/L)	≤ 0,1	0,5	2	> 2
Çinko (µg Zn/L)	≤ 200	500	2000	> 2000
Kadmiyum (µg Cd/L)	≤ 2	5	7	> 7
Krom (µg Cr+6/L)	Ölçülmeyecek kadar az	20	50	> 50
Krom (toplam) (µg Cr/L)	≤ 20	50	200	> 200
Kurşun (µg Pb/L)	≤ 10	20	50	> 50
Nikel (µg Ni/L)	≤ 20	50	200	> 200
Tehlikeli maddeler	Tehlikeli maddeler ve bu Çizelgede verilmeyen diğer kirlleticiler konuyla ilgili ülke envanteri (referans değerler) oluşturulduktan sonra, 1 Ocak 2016'den itibaren değerlendirilecektir.			

(a) Kalite sınıflarına göre suların kullanım maksatları

I. Sınıf - Yüksek kaliteli su (Tüm parametrelerin I. sınıf su kalitesi değerinde olması "Çok İyi" su durumunu ifade etmektedir.);

1) İçme suyu olma potansiyeli yüksek olan yerüstü suları,

2) Yüzme gibi vücut teması gerektirenler dâhil rekreasyonel maksatlar için kullanılabilir su,

3) Alabalık üretimi için kullanılabilir nitelikte su,

4) Hayvan üretimi ve çiftlik ihtiyacı için kullanılabilir nitelikte su,

II. Sınıf - Az kirlenmiş su (I. ve II. sınıf su kalitesi arasındaki değerler "İyi" su durumunu ifade etmektedir.);

1) İçme suyu olma potansiyeli olan yerüstü suları,

2) Rekreasyonel maksatlar için kullanılabilir nitelikte su,

3) Alabalık dışında balık üretimi için kullanılabilir nitelikte su,

4) Mer'i mevzuat ile tespit edilmiş olan sulama suyu kalite kriterlerini sağlamak şartıyla sulama suyu,

III. Sınıf - Kirlenmiş su (II. ve III. sınıf su kalitesi arasındaki değerler "Orta" su durumunu ifade etmektedir.);

Gıda, tekstil gibi nitelikli su gerektiren tesisler hariç olmak üzere, uygun bir arıtmadan sonra su ürünleri yetiştiriciliği için kullanılabilir nitelikte su ve sanayi suyu,

IV. Sınıf - Çok kirlenmiş su (III. ve IV. sınıf su kalitesi arasındaki değerler "Zayıf" su durumunu ve tüm parametrelerin IV. Sınıf su kalitesi değerinde olması "Kötü" su durumunu ifade etmektedir.);

III. sınıf için verilen kalite parametrelerinden daha düşük kalitede olan ve üst kalite sınıfına ancak iyileştirilerek ulaşabilecek yerüstü suları.

(d) Bu gruptaki kriterler parametreleri oluşturan kimyasal türlerin toplam konsantrasyonlarını vermektedir.

EK-6. Deniz Suyunun Genel Kalite Kriterleri (Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 2004)

Parametre	Kriter
Çeşitli ağır metaller	
Bakır, (mg/L)	0,01
Kadmiyum, (mg/L)	0,01
Krom, (mg/L)	0,1
Kurşun, (mg/L)	0,1
Nikel, (mg/L)	0,1
Çinko, (mg/L)	0,1
Civa, (mg/L)	0,004
Arsenik, (mg/L)	0,1

EK-7. Atıksuların Atıksu Altyapı Tesislerine Deşarjında Öngörülen Atıksu Standartları
(Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 2004)

Parametre	Kanalizasyon Sistemleri Tam Arıtma ile Sonuçlanan Atıksu Altyapı Tesislerinde	Kanalizasyon Sistemleri Derin Deniz Deşarjı ile Sonuçlanan Atıksu Altyapı Tesislerinde
Arsenik (As) (mg/L)	3	10
Toplam kurşun (Pb) (mg/L)	3	3
Toplam kadmiyum (Cd) (mg/L)	2	2
Toplam krom (Cr) (mg/L)	5	5
Toplam civa (Hg) (mg/L)	0.2	0.2
Toplam bakır (Cu) (mg/L)	2	2
Toplam nikel (Ni) (mg/L)	5	5
Toplam çinko (Zn) (mg/L)	10	10

EK-8. Çok Tehlikeli ve Daha Az Tehlikeli Maddeler (Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği, 2005)

Çizelge 8.8. Çok tehlikeli maddeler ve bunlara ait özel hükümler

Çok Tehlikeli Maddeler Listesi
1) Civa(Hg), (CAS 7439-97-6)
2) Kadmiyum (Cd), (CAS 7440-43-9)

CAS: Kimyasal Kayıt Numarası

Çizelge 8.9. Daha az tehlikeli maddeler

		Kalite Kriterleri
Grup İsimleri	Tehlikeli Madde İsimleri	Deniz, Kıyı ve Haliç Sularına (4)
Metalik Bileşikler	-Nikel ve Nikel Bileşikleri -Kurşun ve Bileşikleri -Krom -Çinko -Arsenik -Bakır	0,1 mg/L 0,1 mg/L 0,1 mg/L 0.003 mg/L 0,1 mg/L 0.01 mg/L

(1) EK-2 de yer alan parametrelerden 31/12/2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmî Gazete de yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo-25 (Atıksuların Atıksu Altyapı Tesislerinde Deşarjında Öngörülen Atıksu Standartları) inde yer alanlar için Tablo 25 de verilen standart değerler geçerli olup; tabloda yer almayan parametrelerin değerleri envanter çalışması ile belirlenecektir.

(2) EK-2 de yer alan parametrelerden SKKY de yer alan Tablo 5–21 de yer alanlar için; Tablo 5-21 de verilen deşarj standartları geçerli olup; diğerleri envanter çalışması ile belirlenecektir.

(3) Karşılığı olmayan değerler bilinmemekte olup; envanter çalışmaları sonrasında belirlenecektir.

(4) Karşılığı olmayan değerler envanter çalışmaları sonrasında belirlenecektir.

(5) EK-2 de yer alan parametrelerden 31/12/2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo-1 (Kıta içi Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri) inde yer alanlar için Tablo-1 de verilen standart değerler ile Su Ürünleri Yönetmeliğindeki değerlerden en kısıtlayıcı olan geçerli olup; Tabloda yer almayan parametrelerin değerleri envanter çalışması ile belirlenecektir.

EK-9. Cıvaya İlişkin Sektörel Bazda Deşarj Limitleri ve Kalite Kriterleri

Tehlikeli Madde Adı	Sektörler	Deşarj Limitleri (Aylık Limit Değerler)	Ortalama	Kalite Kriterleri -İç Yüzeysel sular -Haliç Suları -Haliç Suları Dışındaki İç Kıyı Suları -Bölgesel Sular
Cıva (Hg)	1-Klor alkali Elektroliz Endüstrisi (Tuzlu suyun geri dönüşümü ve kullanımı)	0,05 mg/L		a)Deşarjdan etkilenen yüzeysel sularda toplam cıva konsantrasyonu bir yıl içinde elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması olarak 1 µg/L'yi aşmamalıdır.
	2-Klorin Üretim Hattından Deşarj(Tuzlu suyun giderilmesi)	0,5 mg/L	1 g/ton	b)Deşarjdan etkilenen haliç sularında toplam cıva konsantrasyonu bir yıl içinde elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması olarak 0,5 µg/L'yi geçmemelidir.
	3-Tesisten Toplam Deşarj (Endüstriyel tesis alanından boşaltılan cıva içeren bütün sularda mevcut toplam cıva miktarına uygulanacaktır.)		5 g/ton	c)Deşarjdan etkilenen haliç suları dışında ki bölgesel deniz suları ve iç kıyı sularında toplam cıva konsantrasyonu bir yıl içinde elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması olarak 0,3 µg/L aşmamalıdır.
	4-Kimyasal Endüstrisi (cıva katalizör olarak kullanılır) a)vinly klorid üretimi b)diğer işlemlerde	0,05 mg/L 0,05 mg/L	0,1g/ton 5 g/kg	d)Suyun kalitesi cıva miktarına ilişkin olarak bu gibi sulara uygulanabilen diğer standartlara da uymak için yeterli olmalıdır.
	5-Vinly klorüd üretiminde kullanılan cıva katalizörü imalatı	0,05 mg/L	0,7 g/kg	e)Örnek olarak seçilen balığın yaş etinde cıva konsantrasyonu 0,3 mg/kg geçmemelidir. (Cıva kirliliğinin göstergesi olarak seçilen balıkta)
	6-Organik ve inorganik cıva bileşiklerinin imalatı (Vinly klorüd üretiminde kullanılan cıva katalizörü imalatı bulunulan ürünler hariç)	0,05 mg/L	0,05 g/kg	f) Çökeltelerde ya da kabuklu deniz ürünlerinde cıva konsantrasyonu zaman içinde artmamalıdır.
	7-Cıva içeren temel batıri imalatı	0,05 mg/L	0,03 g/kg	g) Birkaç kalite kriterlerinin suya uygulandığı yerlerde suyun kalitesi bu kriterlerin her birine uyacak ölçüde yeterli olmalıdır.
	8-Demirsiz metal endüstrisi a)Cıva proses tesisleri b)Demirsiz metallerin ayrıştırılması ve rafine edilmesi	0,05 mg/L 0,05 mg/L		
	9-Cıva içeren toksik atıkların arıtılması tesisleri	0,05 mg/L		
	10-Diğer kaynaklardan deşarj	0,01 g/L (toplama sistemine)		

EK-10. Kadmiyuma İlişkin Sektörel Bazda Deşarj Limitleri ve Kalite Kriterleri

Tehlikeli Madde Adı	Sektörler	Deşarj Limitleri (Aylık Ortalama Limit Değerler)		Kalite Kriterleri -İç Yüzeysel sular -Haliç Suları -Haliç Suları Dışındaki İç Kıyı Suları -Bölgesel Sular
Kadmiyum	1-Çinko madenciliği, çinkonun rafine edilmesi, kadmiyum metali ve demirsiz metal endüstrisi	0,2 mg/L		- İç Yüzey suları: 5µg/L - Haliç Suları: 5µg/l - Bölgesel Sular: 2,5µg/L - Haliç Suları Dışındaki İç Kıyı Suları: 2,5µg/L
	2-Kadmiyum bileşiklerinin imalatı	0,2 mg/L	5 g/kg	
	3-Boya Maddesi Üretimi	0,2 mg/L	5 g/kg	
	4- Stabilizatör İmali	0,2 mg/L	5 g/kg	
	5-Birincil ve İkincil akümülatör İmali	0,2 mg/L	5 g/kg	
	6-Elektrolitik Kaplama	0,2 mg/L	5 g/kg	
	7-Fosforik Asit ve/veya Fosfatlı Kayadan Gübre İmali	--		

EK-11. Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (2010)'ine göre Çamurun Toprakta Uygulama Limitleri

Çizelge 8.10. Topraktaki ağır metal sınır değerleri

Ağır Metal (Toplam)	$6 \leq \text{pH} < 7$ mg. kg ⁻¹ Fırın Kuru Toprak	$\text{pH} \geq 7$ 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
Civa	0,5	1

Çizelge 8.11. Toprakta kullanılabilecek stabilize arıtma çamurunda müsaade edilecek maksimum ağır metal muhtevaları

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

Çizelge 8.12. Toprakta on yıllık ortalama esas alınarak bir yılda verilmesine müsaade edilecek ağır metal yükü sınır değerleri

Ağır Metal (Toplam)	Sınır Yük Değeri (g da ⁻¹ yıl ⁻¹ , kuru madde)
Kurşun	225
Kadmiyum	3
Krom	300
Bakır	300
Nikel	90
Çinko	750
Civa	3

EK-13. Sulama Sularında İzin Verilebilen Maksimum Ağır Metal ve Toksik Elementlerin Konsantrasyonları (Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010)

Elementler	Birim alana verilebilecek maksimum toplam miktarlar, kg/ha	İzin verilen maksimum konsantrasyonlar	
		Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumunda da sınır değerler mg/1	pH değeri 6,0-8,5 arasında olan killi zeminlerde 24 yıldan daha az sulama yapıldığında, mg/1
Alüminyum (Al)	4600	5,0	20,0
Arsenik (As)	90	0,1	2,0
Berilyum(Be)	90	0,1	0,5
Bor (B)	680	3	2,0
Kadmiyum (Cd)	9	0,01	0,05
Krom (Cr)	90	0,1	1,0
Kobalt (Co)	45	0,05	5,0
Bakır (Cu)	190	0,2	5,0
Florür (F)	920	1,0	15,0
Demir (Fe)	4600	5,0	20,0
Kurşun (Pb)	4600	5,0	10,0
Lityum (Li) ¹	-	2,5	2,5
Manganez (Mn)	920	0,2	10,0
Molibden (Mo)	9	0,01	0,05 ²
Nikel (Ni)	920	0,2	2,0
Selenyum (Se)	16	0,02	0,02
Vanadyum (V)	-	0,1	1,0
Çinko (Zn)	1840	2,0	10,0

¹Sulanan narenciye için 0,075 mg/1'dir.

²Yalnız demir içeriği fazla olan asitli killi topraklarda izin verilen konsantrasyondur.

³Tebliğde yer alan Tablo E7.6'da verilmiştir.

EK-14. Geri Kazanılmış Evsel Atıksulardaki Tahmini Eser Madde Konsantrasyonları (mg/l) (Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010)

Elementler, mg/L	İkinci arıtma		Üçüncül arıtma	Ters osmoz	Tavsiye değer*	
	Aralık	Ortalama			Kısa sürelili	Uzun sürelili
Arsenik (As)	<0,005- 0,023	<0,005	<0,001	0,00045	0,10	10,0
Bor (B)	<0,1-2,5	0,7	0,3	0,17	0,75	2,0
Kadmiyum (Cd)	<0,005- 0,15	<0,005	<0,0004	0,0001	0,01	0,05
Krom (Cr)	<0,005- 1,2	0,02	<0,01	0,0003	0,10	20,0
Bakır (Cu)	<0,005- 1,3	0,04	<0,01	0,015	0,20	5,0
Civa (Hg)	<0,002- 0,001	0,0005	0,0001	-	-	-
Molibden (Mo)	0,001- 0,018	0,007	-	-	0,01	0,05
Nikel (Ni)	0,003-0,6	0,004	<0,02	0,002	0,2	2,0
Kurşun (Pb)	0,003- 0,35	0,008	<0,002	0,002	5,0	20,0
Selenyum (Se)	<0,005- 0,02	<0,005	<0,001	0,0007	0,02	0,05
Çinko (Zn)	0,004-1,2	0,04	0,05	0,05	2,0	10,0

* EPA'nın tavsiyesi

ÖZGEÇMİŞ

AYŞEGÜL KEYİKOĞLU

ayseguldemircan@outlook.com.tr



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2015-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2010-2014	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Keyikoğlu A., Kıvılcımdan Moral Ç. (2018). Fate of Heavy Metals in Wastewater Treatment Plants: Sampling During Summer Period in Antalya. Ejons 5. International Congress on Mathematics, Engineering, Natural and Medical Sciences.

2- Keyikoğlu A., Kıvılcımdan Moral Ç. (2019). Atıksu Arıtma Tesislerinde Ağır Metallerin Akıbeti: Antalya Sonbahar Dönemi Örneği” Ecsac 4. European Conference on Science.